

PAULO CÉSAR ARTUR

**PALEOLINEAMENTOS NA BACIA DO PARANÁ:
FAVORABILIDADE PARA ACUMULAÇÕES
DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-
Graduação em Geologia, Área de Concentração
em Geologia Exploratória, Setor de Ciências da
Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador Principal:
Prof. Dr. Paulo César Soares

Co-orientadores:
Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla
Prof. Dr. Raimundo Almeida Filho

CURITIBA

1998

PAULO CÉSAR ARTUR

PALEOLINEAMENTOS NA BACIA DO PARANÁ :
FAVORABILIDADE PARA ACUMULAÇÕES DE PETRÓLEO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre
no Curso de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná,
pela Comissão formada pelos professores :

Orientador: Prof. Paulo César Soares
Setor de Ciências da Terra, UFPR

Prof. Edison José Milani
PETROBRÁS S.A.

Prof. Hernani Aquini Fernandes Chaves
Departamento de Geologia/Geofísica, UERJ

Curitiba, 31 de agosto de 1998.

Dedico este trabalho :

Aos meus pais José Carlos e Mary pelo carinho, dedicação e incentivo.

Ao meu querido filho Matheus, a maior alegria de minha vida, como um pedido de desculpas pelos vários momentos em que deixei de passar junto a ele.

À memória do geólogo Celso Hilário Raffaelli, a quem devo meus sinceros agradecimentos pelas colaborações e, principalmente, pela demonstração de boa vontade, otimismo e humildade.

AGRADECIMENTOS

Poucas... mas essenciais. À estas pessoas gostaria de deixar registrado meus sinceros agradecimentos, pelo apoio incondicional ao longo de minha formação científica.

À Giane, por compreender a importância deste trabalho para mim.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo César Soares, amigo a toda hora, por sempre me mostrar o verdadeiro caminho da ética profissional. Aos meus co-orientadores Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla, pelas valiosas discussões, sugestões e críticas construtivas, e Prof. Dr. Raimundo Almeida Filho, pela incrível paciência e compreensão.

Ao Prof. Dr. Mario Luis Assine, pela ajuda fundamental durante a fase de análise dos perfis compostos e pelas oportunidades de discussão sobre a geologia da Bacia do Paraná.

Ao Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira, o Chico, pela preocupação e por ser um grande incentivador de minha pesquisa.

Ao Prof. Dr. Augustinho Rigotti pelo constante apoio moral e pela revisão do *abstract*.

Ao colega Rodoflton Stevanato, companheiro de martírio, pelas discussões geoestatísticas.

Ao Prof. Dr. Elvo Fassbinder e Sr. Nilson Giraldi, pelos conselhos e incentivo.

Aos companheiros Gilvan, Max e Valdyr pela assessoria computacional e pela notável disposição de trabalho.

Aos colegas mestrados em geral, por fazerem do local de estudo um ambiente mentalmente saudável.

Aos amigos do Departamento de Geologia, Rosalda, Oto, Edson, Juarez, Neimar e Oswaldo, por sempre atenderem aos meus pedidos com a maior atenção, e pelos momentos de descontração.

Às bibliotecárias do Setor de Tecnologia, Eliane, Milena e Heloísa por sempre me atenderem com dedicação e incontestável competência profissional.

Ao Departamento de Geociências da UFPR, por autorizar a utilização do *software* Maxicad em suas dependências. Ao Departamento de Geologia da UFPR, por permitir total acesso e usufruto de seu Laboratório de Informática.

À Petrobrás/Nexpar, por sempre me receber de portas abertas e pelos dados concedidos em projetos anteriores.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1 INTRODUÇÃO	01
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	02
1.2 ESTADO DA ARTE	09
1.3 OBJETIVOS E OBJETO DE ESTUDO	14
2 TECTONO-ESTRATIGRAFIA E SISTEMAS PETROLÍFEROS	
DA BACIA DO PARANÁ.....	16
2.1 ESTRUTURAS DO EMBASAMENTO	16
2.2 SEQUÊNCIAS TECTONOSSEDIMENTARES	21
2.3 SISTEMAS PETROLÍFEROS	31
3 MÉTODOS E MEIOS	38
3.1 AQUISIÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	38
3.2 ANÁLISE DE TENDÊNCIA	42
3.3 ANÁLISE VARIOGRÁFICA	43
3.4 KRIGAGEM	55
3.5 ANÁLISE MORFOESTRUTURAL	60
3.6 ANÁLISE DE FAVORABILIDADE.....	62
4 ANÁLISE DOS DADOS DE ESPESSURA.....	65
4.1 TENDÊNCIAS REGIONAIS.....	71

4.2 CONTINUIDADE ESPACIAL.....	83
4.3 ESTIMATIVA DE VALORES.....	113
5 ANÁLISE DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS.....	118
5.1 TENDÊNCIAS REGIONAIS.....	121
5.2 CONTINUIDADE ESPACIAL.....	124
5.3 ESTIMATIVA DE VALORES.....	128
5.4 SOMBREAMENTO DO RELEVO GRAVIMÉTRICO	129
6 RESULTADOS OBTIDOS	131
6.1 CARACTERIZAÇÃO DE PALEOLINEAMENTOS.....	131
6.1.1 STDM INFERIOR	132
6.1.2 STDM SUPERIOR	140
6.1.3 STPP INFERIOR	146
6.1.4 STPP SUPERIOR	149
6.1.5 STTJ INFERIOR	152
6.1.6 INTRUSIVAS	155
6.1.7 GRAVIMETRIA	161
6.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO E PROTEÇÃO DOS SISTEMAS PETROLÍFEROS.....	165
6.3 QUANTIFICAÇÃO DE FAVORABILIDADE.....	170
7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	185
8 CONCLUSÕES	194
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195

LISTA DE FIGURAS

1	Tipos básicos de trapas para hidrocarbonetos (áreas escuras) associadas a estilos estruturais em bacias sedimentares. No quadro, algumas características relacionadas a cada estilo estrutural e exemplos de bacias produtoras.....	04
2	A) Principais feições estruturais dos campos de óleo e gás na Bacia de Illinois (EUA). A maior parte da produção de petróleo está associada a anticlinais. B) Detalhe da relação espacial entre os campos de óleo e o sistema de falhas <i>Wabash Valley</i> . O sistema mostra alinhamento N-NE e é composto por falhas normais de alto ângulo, ao longo das quais foram perfuradas centenas de poços.....	05
3	Estrutura de fechamento mapeada em calcários da Formação Renault (Bacia de Illinois), a qual condicionou o campo Plummer. Os contornos são dados em pés.....	06
4	Campos de óleo na Bacia do Báltico, alguns dos quais controlados por falhas. Os valores das curvas são de contorno estrutural (em metros) do topo da sequência produtiva.....	06
5	Localização da área de concentração dos estudos.....	15
6	Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná.....	17
7	Representação dos principais blocos continentais e cinturões colisionais, posicionados sob e em torno da Bacia do Paraná.....	20
8	Quadro-resumo das principais características litológicas e paleoambientais do Grupo Rio Ivaí.....	27
9	Quadro-resumo das principais características litológicas e paleoambientais do Grupo Paraná.....	28
10	Quadro-resumo das principais características litológicas e paleoambientais do Supergrupo Tubarão.....	29
11	Quadro-resumo das principais características litológicas e paleoambientais do pacote sedimentar do Grupo São Bento.....	30
12	Delimitação geográfica (acima) e estratigráfica (abaixo) de um sistema petrolífero.....	32

13	Organograma de um sistema petrolífero. Os elementos ligados ao sistema de alimentação e de armazenamento correspondem ao conjunto de evidências geológicas indicadoras dos processos formadores de acumulações de petróleo.....	33
14	Esquema simplificado do funcionamento de um sistema petrolífero, mostrando os subsistemas componentes e as transferências de matéria e energia.....	33
15	Exemplo de um sistema petrolífero com baixa impedância, baseado em caso da Bacia de Williston (EUA).....	36
16	Diagrama ilustrando a prática de agrupamento de um conjunto de pares numa determinada classe, a fim de gerar valores-semivariograma mais robustos.....	46
17	Componentes básicos de um semivariograma.....	46
18	Semivariogramas direcionais obtidos a partir da análise de um fenômeno anisotrópico. Maior continuidade espacial ocorre na direção E/W.....	48
19	Modelo variográfico teórico de Gauss e a equação que o define.....	50
20	Localização e valor das cotas dos dados referentes ao caso simulado.....	51
21	Mapas de tendência da distribuição dos valores hipotéticos.....	51
22	Na superfície-variograma cada <i>pixel</i> representa uma medida de continuidade espacial e os valores em x e y indicam a distância média de combinação entre as amostras. Notar a forte estruturação nordeste.....	53
23	Semivariogramas direcionais refletindo a anisotropia do fenômeno.....	53
24	Modelagem dos semivariogramas das direções de anisotropia N45E (A) e N45W(B). Cada valor-semivariograma contém o número de pares utilizados para seu cálculo.....	54
25	Mapa dos valores de cota do embasamento estimados pelo método da krigagem.....	59
26	Mapa de distribuição dos erros associados às estimativas de valores.....	59

27	Modelos geológicos previstos na análise dos mapas de contorno. As linhas em azul são isovalores, as zonas em vermelho representam faixas estruturais e as cercas em cinza, ilustram a variação tridimensional da variável, como por exemplo, espessura.....	61
28	Representação estatística dos conceitos de necessidade e suficiência. Em (A) a área tracejada representa a distribuição de uma variável necessária e em (B), a de uma variável suficiente. Nota-se que as variáveis não representam graus máximos de necessidade e suficiência.....	63
29	Desenho esquemático representando situações onde valores de espessura de zero metro podem e não, ser utilizados.....	68
30	Histogramas das distribuições das espessuras. Comentários no texto.....	70
31	Gráfico ilustrando os ajustes obtidos com as análises de tendência de primeira a quarta ordem sobre os dados de espessura.....	72
32	Mapas de tendência de 1ª (40,4%), 2ª (58,4%) e 3ª ordem (85,5%) da unidade STDM Inferior.....	75
33	Mapas de tendência de 1ª (30,7%), 2ª (50,9%), 3ª (64,5%) e 4ª ordem (78,4%) da unidade STDM Superior.....	77
34	Mapas de tendência de 1ª (70,4%) e 2ª ordem (89,9%) da unidade STPP Inferior.....	78
35	Mapas de tendência de 1ª (58%) e 2ª ordem (94,2%) da unidade STPP Superior.....	79
36	Mapas de tendência de 1ª (13,8%), 2ª (40,8%), 3ª (53,9%) e 4ª ordem (80,4%) da unidade STTJ Inferior.....	81
37	Mapas de tendência de 1ª (56,2%), 2ª (62,8%) e 3ª ordem (80,6%) mostrando a distribuição regional das rochas intrusivas.....	82
38	Exemplo da técnica de média móvel para o passo adotada neste trabalho. A distância e a tolerância entre os passos são de 10 km.....	85
39	Exemplo de uma modelagem desenvolvida no Variowin 2.2.....	88
40	Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).....	89
41	Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 3 (B). Em ambos foram adotados passos de 80 ± 80 km...	90

42	Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3 da STDM Inferior. Passos de 70 ± 70 km e tolerância angular de 60°	91
43	Modelagem do semivariograma omnidirecional ajustado à estrutura bacinal. Passos de 80 ± 80 km.....	92
44	Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).....	93
45	Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 3 (B) da STDM Superior. Os valores estabelecidos para os passos foram de 60 ± 60 km.....	93
46	Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3 da STDM Superior. Passos de 60 ± 60 km e tolerância angular de 30°	95
47	Modelo gaussiano ajustado aos semivariogramas da direção N30W (A) e N60E (B) para a STDM Superior. As dimensões adotadas para os passos foram de 70 ± 80 km e tolerância angular de 40°	96
48	Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 2 (B).....	97
49	Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 2 (B) da STPP Inferior. Os valores estabelecidos para os passos foram de 80 ± 80 km.....	97
50	Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 2 da STPP Inferior. Passos de 90 ± 90 km e tolerância angular de 40°	99
51	Modelagem dos semivariogramas direcionais N30E (A) e N60W (B) para a STPP Inferior. Os passos apresentam dimensões de 90 ± 90 km.....	100
52	Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 2 (B).....	101
53	Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 2 (B) da STPP Superior. Os passos são de 80 ± 80 km.....	101
54	Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 2 da STPP Superior. Passos de 60 ± 60 km e tolerância angular de 45°	103
55	Modelagem dos semivariogramas das direções N20E (A) e N70W (B) para a STPP Superior. Os passos são de 50 ± 50 km e a tolerância angular de 45°	104
56	Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).....	105

57	Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 3 (B) da STTJ Inferior. Os passos são de 60 ± 60 km.....	105
58	Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3 da STTJ Inferior. Passos de 50 ± 60 km e tolerância angular de 60°	107
59	Modelagem dos semivariogramas das direções N75E (A) e N65W (B) para a STTJ Inferior. Os passos são de 50 ± 60 km e a tolerância angular de 60°	108
60	Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).....	109
61	Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 3 (B) das INTRUSIVAS. Os valores estabelecidos para os passos foram de 60 ± 60 km.....	109
62	Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3 das INTRUSIVAS. Passos de 60 ± 60 km e tolerância angular de 45°	111
63	Modelo gaussiano ajustado aos semivariogramas da direção N15E (A) e N75W (B) para as INTRUSIVAS. Os passos são de 80 ± 80 km e a tolerância angular de 45°	112
64	Sequência de procedimentos para uma estimativa por krigagem desenvolvida no Surfer 6.02. Comentários no texto.....	114
65	A) Distribuição dos 19.676 dados gravimétricos originais. B) Distribuição dos 1.005 dados selecionados aleatoriamente.....	118
66	Histogramas de distribuição dos dados gravimétricos. (A) 19.676 dados e (B) 1.005 dados.....	120
67	Perfil gravimétrico mostrando a remoção de um <i>trend</i> regional ao longo de uma anomalia.....	122
68	Mapas de tendência de 1ª (72,6%), 2ª (83,4%) e 3ª ordem (86,5%) dos dados gravimétricos.....	123
69	Semivariogramas omnidirecionais dos dados brutos de anomalia Bouguer (A) e dos resíduos de grau 3 (B). Em ambos foram adotados passos de 60 ± 60 km.....	125
70	Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).....	125
71	Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3. Passos de 60 ± 60 km e tolerância angular de 30°	126

72	Modelagem dos semivariogramas das direções N60E (A) e N30W (B). Os passos são de 30 ± 30 km e a tolerância angular de 45°	127
73	Janelas de trabalho do SURFER que permitem : (A) aplicar o sombreamento de relevo e (B) redefinir a geometria de um <i>grid</i> com a inserção de novas celas.....	130
74	Simbologia e significado dos lineamentos traçados sobre os mapas de contorno.....	132
75	Mapa de resíduos de 3ª ordem da STDM Inferior, refletindo estruturas de caráter regional.....	134
76	Modelo gaussiano ajustado ao semivariograma omnidirecional da STDM Inferior.....	135
77	Mapa de resíduos de 3ª ordem da STDM Inferior, evidenciando estruturas de caráter local, não presenciadas no mapa da Figura 75.....	136
78	Paleo-estruturas regionais traçadas sobre mapa de resíduos de 3ª ordem da STDM Inferior.....	138
79	Paleo-estruturas locais traçadas sobre mapa de resíduos de 3ª ordem da STDM Inferior.....	139
80	Mapa dos resíduos de 3ª ordem da STDM Superior, refletindo estruturas regionais alinhadas, preferencialmente, na direção noroeste.....	141
81	Modelos ajustados aos semivariogramas direcionais da STDM Superior : (A) N60E e (B) N30W. Os passos são de 20 ± 20 km e a tolerância angular é de 60°	142
82	Mapa dos resíduos de 3ª ordem da STDM Superior, refletindo estruturas de caráter local.....	143
83	Paleo-estruturas regionais delineadas sobre mapa de resíduos de 3ª ordem da STDM Superior. Notar o predomínio de estruturas NW....	144
84	Paleo-estruturas locais identificadas na STDM Superior, com destaque para estruturas nordeste que atuaram desde o início da sedimentação do Grupo Paraná.....	145
85	Mapa dos resíduos de 2ª ordem da STPP Inferior, marcado pela notável compartimentação de blocos estruturais na época da sedimentação.....	147

86	Paleo-estruturas identificadas em mapa de resíduos de 2ª ordem da STPP Inferior.....	148
87	Mapa de contorno dos resíduos de 2ª ordem da STPP Superior, com destaque para a forte estruturação regional NNE.....	150
88	Paleo-estruturas traçadas sobre mapa de distribuição dos resíduos de 2ª ordem da STPP Superior.....	151
89	Mapa dos resíduos de 3ª ordem da STTJ Inferior, onde se destaca a presença de um grande cinturão deposicional interligando quatro sub-bacias.....	153
90	Paleo-estruturas traçadas sobre mapa de contorno dos resíduos de 3ª ordem da STTJ Inferior.....	154
91	Mapa de distribuição dos resíduos de 3ª ordem de espessura das intrusivas. Notar o forte controle NNE durante o alojamento dos corpos.....	156
92	Modelos ajustados aos semivariogramas direcionais : (A) N15E e (B) N75W. Os passos são de 30±30 km e a tolerância angular é de 45°.....	157
93	Mapa de distribuição dos resíduos de 3ª ordem das intrusivas, refletindo estruturas de caráter local.....	159
94	Paleo-estruturas identificadas sobre o mapa de contorno dos resíduos de 3ª ordem das intrusivas.....	160
95	Mapa de distribuição dos resíduos de 3ª ordem dos dados gravimétricos.....	162
96	Sombreamento do relevo gravimétrico residual com iluminação de N35W, destacando-se as principais estruturas NE.....	163
97	Feições lineares do relevo gravimétrico residual, com predominância de estruturas NE.....	164
98	Limites das áreas com maior potencial de geração e proteção do Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé.....	168
99	Limites das áreas com maior potencial de geração e proteção do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê.....	169

100	Disposição da malha de celas, utilizada na etapa de quantificação das relações entre variáveis e ocorrências. Cada cela apresenta uma área de 225 km ²	171
101	Modelo esférico ajustados ao semivariograma omnidirecional. Os passos são de 20±10 km.....	177
102	Mapa de favorabilidade para o Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé.....	179
103	Modelo esférico ajustado ao semivariograma omnidirecional. Os passos são de 20±10 km.....	182
104	Mapa de favorabilidade para o Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê.....	183
105	Faixas estruturais definidas por Soares <i>et al.</i> (1982), às quais foram atribuídas as seguintes denominações : MI (Médio Ivaí), PQ (Médio Piquiri), PR (Paraná), GO (Goixim) e PT (Pitanga).....	188
106	Estruturas regionais mapeadas por Zalán <i>et al.</i> (1987). Apenas aquelas feições citadas no texto estão nomeadas. 1 : zona de falha de Guapiara; 2 : falha do Rio Alonzo; 3 : falha de Jacutinga; 4 : zona de falha de Taxaquara; 5 : zona de falha Lancinha-Cubatão.....	189

LISTA DE TABELAS

1	Relação dos programas computacionais utilizados na pesquisa.....	39
2	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais do caso simulado.....	57
3	Subdivisão operacional do registro estratigráfico da Bacia do Paraná adotada neste trabalho.....	66
4	Resultados obtidos na análise estatística descritiva dos dados de espessura.....	69
5	Resultados numéricos dos ajustes obtidos.....	72
6	Tipos de mapas de tendência gerados a partir dos dados de espessura.....	73
7	Variáveis e parâmetros utilizados no cálculo dos semivariogramas direcionais.....	84
8	Variáveis e parâmetros utilizados no cálculo dos semivariogramas para pequenas estruturas.....	87
9	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STDM Inferior.....	115
10	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STDM Superior.....	116
11	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STPP Inferior.....	116
12	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STPP Superior.....	116
13	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STTJ Inferior.....	117
14	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais das INTRUSIVAS.....	117
15	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais.....	128
16	Parâmetros utilizados na modelagem do semivariograma omnidirecional.....	135

17	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais.....	142
18	Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais.....	157
19	Exemplo de parte de uma planilha de dados construída no Excel. Notar que v_1 , v_2 , v_3 e v_4 são as variáveis cujos valores foram discretizados com valores 1 e 0.....	172
20	Listagem das variáveis utilizadas na quantificação de favorabilidade no Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé.....	175
21	Relação dos poços que foram discretizados por valores 1.....	175
22	Valores de ponderação e contraste para cada variável do Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé.....	175
23	Parâmetros variográficos adotados na krigagem.....	177
24	Listagem das variáveis utilizadas na quantificação de favorabilidade no Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê.....	180
25	Relação dos poços que foram discretizados por valores 1.....	180
26	Valores de ponderação e contraste para cada variável do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê.....	181
27	Parâmetros variográficos adotados na krigagem.....	182

RESUMO

A importância do papel desempenhado pelas estruturas tectônicas regionais de bacias intracratônicas, durante o processo de acumulação-retenção do petróleo em trapas estruturais, vem sendo enfatizada há muito tempo por diversos autores. As relações espaciais entre feições estruturais e áreas de ocorrência de campos de petróleo são muito bem documentadas em bacias produtoras. Na Bacia do Paraná, os programas exploratórios desenvolvidos até o momento não direcionaram suas estratégias priorizando a existência das grandes estruturas lineares reconhecidas na bacia. Neste trabalho foi testado um procedimento metodológico envolvendo estudos de análise de tendência e análise geoestatística de dados de espessura, tendo como objetivo identificar paleo-estruturas e direções controladoras da sedimentação e erosão-preservação das sequências tectonossedimentares que compõem o registro preservado da Bacia do Paraná. Para isso, foram selecionados pacotes limitados por superfícies discordantes ou de máxima inundação, os quais representam as partes inferiores e superiores dos registros Devoniano, Pensilvaniano-Permiano e Triássico Inferior. Para a parte inferior foi investigada a tectônica formadora das sequências, enquanto que para a superior a tectônica modificadora. Estas seções foram delimitadas em perfis de poços para petróleo e com base na listagem de topo e base de formações, fornecidos pela Petrobrás. A análise de tendência efetuada sobre os valores de espessura permitiu reconhecer fenômenos de amplitude regional, e após sua retirada dos dados foi possível avaliar, através da análise variográfica dos resíduos, as variações de espessura não relacionadas aos *trends* regionais. Para cada sequência analisada foram construídos semivariogramas direcionais, possibilitando a identificação das direções de maior e menor continuidade espacial. Com isso, foram reveladas as direções estruturais ativas em intervalos distintos de tempo geológico. Os parâmetros variográficos obtidos nas modelagens dos semivariogramas de cada sequência, foram adotados nas estimativas por krigagem dos dados de resíduo, e assim, feições morfológicas foram traçadas sobre os mapas gerados. Estas feições morfoestruturais, tais como gradientes anômalos, alinhamento de flexões nas curvas, alinhamento de narizes e depressões, foram traçadas manualmente e interpretadas como paleo-estruturas e paleolineamentos ativos na época de sedimentação dos pacotes sobre discordância e de erosão dos pacotes sob discordância. Procedimentos similares foram adotados para investigar a distribuição dos corpos intrusivos concordantes em meio aos pacotes sedimentares, tendo em vista sua possível associação com sistemas de falhas profundas durante o magmatismo e, portanto, com zonas mais quentes na época de geração e migração do petróleo. Os paleolineamentos foram posteriormente comparados com feições reveladas por tratamento similar de dados gravimétricos, a fim de associá-los com estruturas do embasamento. Finalmente, as paleo-estruturas definidas nesse estudo foram comparadas com estruturas identificadas por outros autores que utilizaram diferentes métodos, entre os quais sensoriamento remoto e magnetometria. Considerando-se, a princípio, a importância do controle dos paleolineamentos nas acumulações de petróleo, foi empregado um método de quantificação de favorabilidade baseado na análise probabilística condicional, com o objetivo de investigar o poder destas estruturas como indicadoras de zonas de alimentação dos sistemas acumuladores. Os resultados sugerem que as regiões mais favoráveis da bacia para o Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé estão relacionadas a paleolineamentos com direção nordeste identificados no Devoniano e reativados até o recente. No Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê as áreas mais favoráveis estão relacionadas às falhas com direção nordeste, ativas entre os períodos Triássico e Juro-Cretáceo, adicionalmente às regiões que sofreram aquecimento anômalo devido à intrusão de maiores espessuras de corpos intrusivos em meio às rochas geradoras.

ABSTRACT

In intracratonic basins the importance of regional structures for petroleum accumulation-retention in structural traps has been emphasized by several authors. Structural features and their spatial relationships with oil fields in productive basins are very well documented. In the Paraná Basin strategies so far used for the exploration programs have not considered decisively the major structures. In the present study, a methodological procedure was applied in order to identify and to evaluate the history and the role of regional structures. Trend surface and geostatistical analysis of layer thickness data are applied to identify controlling structural directions in the sedimentation and erosion-preservation of the tectonic-sedimentary sequences. It were selected rock packages limited by unconformities or by maximum flood surfaces, which represent the lower and upper parts of the Devonian, Pensilvanian-Permian and lower part of Triassic ages. Forming and modifier tectonics were investigated for the lower and upper parts independently. The sequence boundaries were slightly modified from conventional usage, based on well logs and also from the formations top and base list, both supplied by Petrobrás. The trend surface analysis of the thickness values allowed to recognize regional trends in the basin, and the residuals values were worked out through variographic analysis. In that way, the sequence thickness variations not related to the regional trends were studied. For each sequence residuals, directional semivariograms were built up for identification of the directions of maximum and minimum spatial continuity. With that procedure, the active structural directions were revealed for each interval of geological time. The variographic parameters obtained from semivariograms modeling were adopted in kriging estimates of the thickness residuals, and so morphologic features were contoured in the maps generated. These features, such as anomalous gradients, strike discontinuities and alignment of noses and depressions were interpreted as tectonic structures. They were traced manually and interpreted as active paleostructures and paleolineaments, either in periods of sedimentation for those packages lying over the unconformity or of erosion of those under unconformity. Similar procedures were adopted to investigate the distribution of the concordant intrusive bodies which occur in the sedimentary units. They could be associated with deep faults systems during the magmatic event and, therefore, with hotter zones at the time of petroleum generation and migration. The paleolineaments so defined in this study were compared with structures revealed by similar treatment and analysis of gravimetric data in order to associate with basement structures. They were further compared with structures identified by other authors working with remote sensing and other different techniques. The petroleum accumulation favorability, based on the conditional probability analysis, was used for evaluation of these structures as indicative of feeding zones of petroleum systems. The results suggest that : 1) the most favorable areas of the Ponta Grossa-Itararé Petroleum System are those associated with northeast paleolineaments, identified in Devonian sequence and reactivated until the recent and; 2) the most favorable areas of the Irati-Rio Bonito/Tietê Petroleum System are related to northeast faults active during the Triassic and Juro-Cretaceous periods, additionally to areas that suffered anomalous heating, due to the intrusion of large intrusive bodies.

1 INTRODUÇÃO

Os programas exploratórios costumam utilizar estudos estruturais detalhados para a compreensão da história deformacional de uma bacia sedimentar, visando a determinação da cronologia dos eventos tectônicos e da época de migração do petróleo. A predição do padrão regional e da ocorrência de estruturas baseia-se no conhecimento prévio dos processos tensionais atuantes na bacia, e dos padrões derivados destes processos. Verifica-se com isso, que a importância prática da geologia estrutural na avaliação exploratória de qualquer província sedimentar, se reflete em sua aplicação direta nos estudos sobre migração e acumulação de hidrocarbonetos e, principalmente, sobre tipos de estruturas e trapas dentro das quais eles circulam (Link 1987). Os especialistas em geologia do petróleo de bacias intracratônicas ressaltam, constantemente (p.e., Leighton *et al.* 1990), o quanto é vital a compreensão dos estilos estruturais para entender a origem das bacias, e para melhor direcionar a exploração de seus recursos naturais.

Para a identificação das estruturas tectônicas regionais conhecidas até o momento na Bacia do Paraná, já foram empregados diferentes métodos geológicos e geofísicos tais como, mapeamento de superfície, análise morfoestrutural sobre imagens de satélite e radar e análise de feições do relevo magnético e gravimétrico. Algumas funções já foram atribuídos à essas estruturas, desde a de controladoras da sedimentação até a responsabilidade pela erosão e preservação diferencial de algumas unidades estratigráficas. No entanto, apesar de diversos autores terem constatado a influência dos lineamentos durante o desenvolvimento da bacia (Ferreira 1982, Fúlfaro *et al.* 1982; Zalán *et al.* 1987; Soares 1991), permanecem ainda muitas dúvidas quanto à origem das estruturas, o tempo em que estiveram ativas e o papel que desempenharam ao longo da evolução bacinal. Por isso, é de fundamental importância entender os grandes lineamentos como estruturas litosféricas, bem marcadas no embasamento da bacia e

que portanto, devem refletir uma história longa, recorrente e controlada por geometrias herdadas.

Fatores geológicos complicadores tais como, a espessa cobertura basáltica que recobriu a bacia, as estruturas dadas pelo diques e a tectônica pós-basalto, têm dificultado a utilização das estruturas regionais como objeto de exploração na Bacia do Paraná.

No presente trabalho adotou-se um procedimento metodológico, na tentativa de identificar feições indicadoras de paleolineamentos, o qual se resume na aplicação de técnicas de análise de tendência e geoestatística sobre dados gravimétricos e de espessura, seguidas de análise morfoestrutural sobre os mapas de isovalores resultantes. Além disso, o tratamento e análise em separado de pacotes de rocha limitados por discordâncias ou superfícies de máxima inundação, proporcionou a revelação de estruturas representativas e particulares de intervalos específicos do tempo geológico.

Além desta primeira etapa onde as atividades foram direcionadas na investigação e caracterização de paleolineamentos regionais, o passo seguinte foi avaliar quantitativamente, a favorabilidade para ocorrência de acumulações de petróleo controladas por essas feições estruturais, nos sistemas petrolíferos Ponta Grossa-Itararé e Irati-Rio Bonito/Tietê.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A concepção de que determinados estilos estruturais desenvolvidos em bacias sedimentares contribuem, de maneira fundamental, para a existência de acumulações econômicas de hidrocarbonetos, tem sido enfatizada por diversos autores (Harding e Lowell 1979, Soares 1982, North 1985, Lowell 1985, Milton e Bertram 1992).

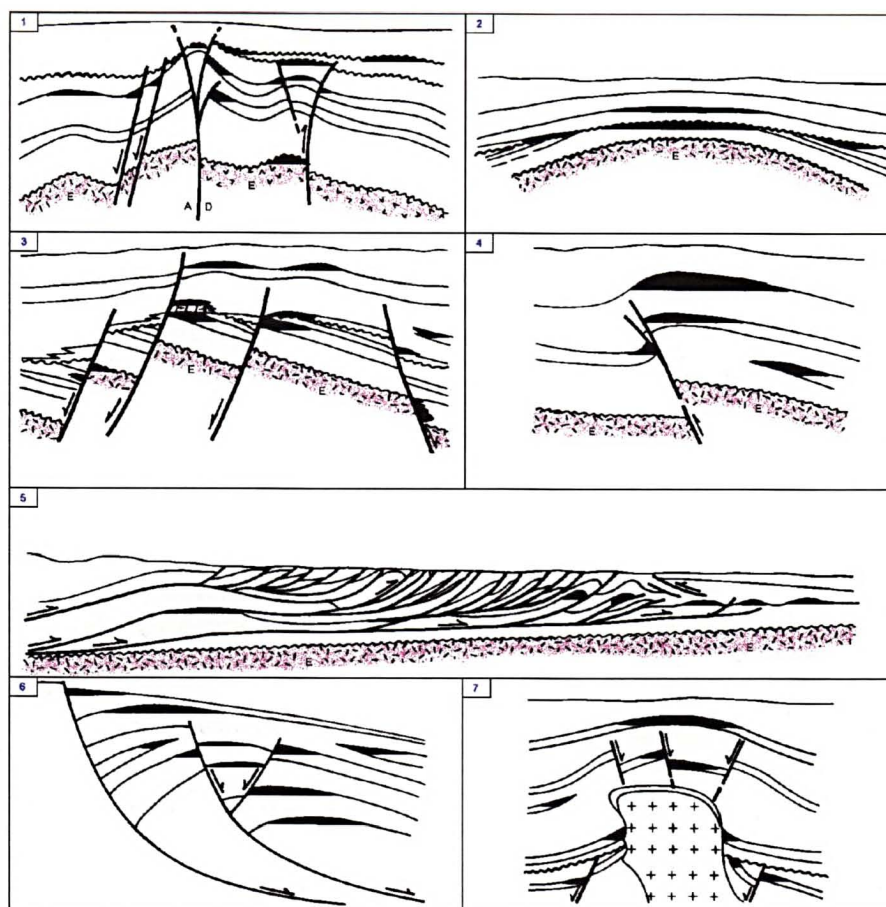
Cada estilo estrutural é definido por uma assembléia de elementos tectonicamente relacionados, e ainda pelo seu arranjo espacial. Uma bacia sedimentar pode apresentar

diferentes estilos e transições entre eles e além disso, esses estilos podem ocorrer separadamente ou estarem superpostos (Harding e Lowell 1979). Os tipos básicos de trapas e estilos estruturais associados são ilustrados na Figura 01; observa-se a existência de dois conjuntos distintos de estilos, classificados quanto ao envolvimento ou não do embasamento da bacia na geração dos mesmos.

O envolvimento do embasamento durante a evolução tectonossedimentar das bacias intracratônicas é fato comprovado e não contestado. Os estilos estruturais são bem documentados e compreendidos em bacias produtoras como em Illinois, Michigan, Williston e Sibéria Ocidental, graças ao intenso desenvolvimento exploratório.

O reconhecimento e caracterização espaço-temporal dos elementos estruturais que compõem um determinado estilo numa bacia, constitui uma etapa fundamental em qualquer atividade exploratória. Tal procedimento permite avaliar os tipos possíveis de trapas, além de favorecer a previsibilidade de seus padrões de distribuição. A necessidade da presença de algumas feições estruturais para a ocorrência de grandes acumulações de hidrocarbonetos em bacias intracratônicas, é sugerida pela íntima relação espacial entre as principais estruturas e as áreas de ocorrência dos campos de petróleo (Figuras 02 a 04).

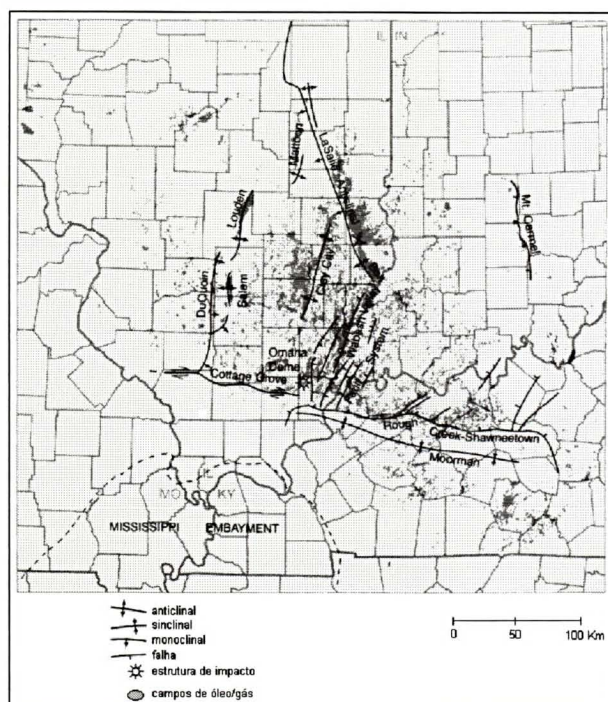
Um fato interessante merece destaque nas figuras 2-B e 4 : os campos de óleo encontram-se posicionados, espacialmente, entre as grandes falhas (área de influência) e não sobre estas. Certamente estas estruturas regionais exerceram um forte controle no processo de acumulação do petróleo, atuando por exemplo, como zonas de alimentação; no entanto, as acumulações ficaram aprisionadas em trapas associadas às falhas, como em anticlinais. Este fato pode também ser constatado nos exemplos dados na Figura 1. Essa questão será retomada no capítulo 7, direcionada ao caso da Bacia do Paraná.



Estilo Estrutural	Esforços Dominantes	Tipo de Transporte	Hábitats Tectônicos	Bacias Petrolíferas
1. Falhas transcorrentes	binário	rejeito direcional	limites transformantes	Ventura (EUA), Ardmore (EUA)
2. Arcos, domos, sinéclises	eventos termais, isostasia,...	soerguimento, subsidência	interior das placas	Williston (EUA), S. Joaquin Valley (EUA)
3. Blocos de falhas normais	extensão horizontal	divergente de baixo a alto ângulo	limites divergentes	Recôncavo (BRA), Mar do Norte (RSFSR)
4. Blocos de falhas reversas	compressão horizontal	convergente de baixo a alto ângulo	limites convergentes	Bighorn (EUA), Sibéria Ocidental
5. Falhas de cavalgamento	compressão horizontal	convergente de sub-horiz. a alto ângulo	limites convergentes	Zagros (IRÃ), Orinoco (VEN)
6. Falhas de descolamento	extensão horizontal	divergente de sub-horiz. a alto ângulo	limites passivos	Costa do Golfo (EUA), Delta do Niger (NIG)
7. Estruturas de sal	Contraste de dens., carga diferencial	fluxos verticais e horizontais	limites divergentes	Costa do Golfo (EUA), Campos (BRA)

FIGURA 01 - Tipos básicos de trapas para hidrocarbonetos (áreas escuras) associadas a estilos estruturais em bacias sedimentares (E, *embasamento*; A, *movimento afastando-se do leitor*; D, *movimento em direção ao leitor*). No quadro, algumas características relacionadas a cada estilo estrutural e exemplos de bacias produtoras (adaptado de Harding e Lowell 1979).

(A)



(B)

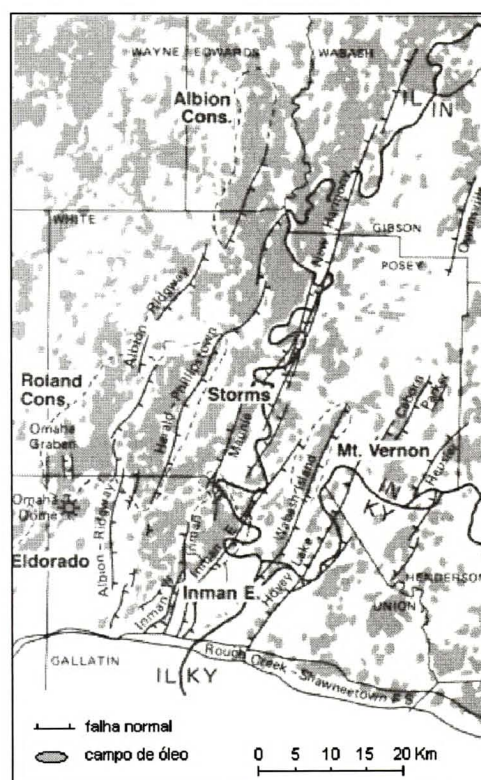


FIGURA 02 - A) Principais feições estruturais dos campos de óleo e gás na Bacia de Illinois (EUA). A maior parte da produção de petróleo está associada a anticlinais (modif. de Seyler e Cluff 1990). B) Detalhe da relação espacial entre os campos de óleo e o sistema de falhas *Wabash Valley*. O sistema mostra alinhamento N-NE e é composto por falhas normais de alto ângulo, ao longo das quais foram perfuradas centenas de poços (modif. de Nelson 1990).

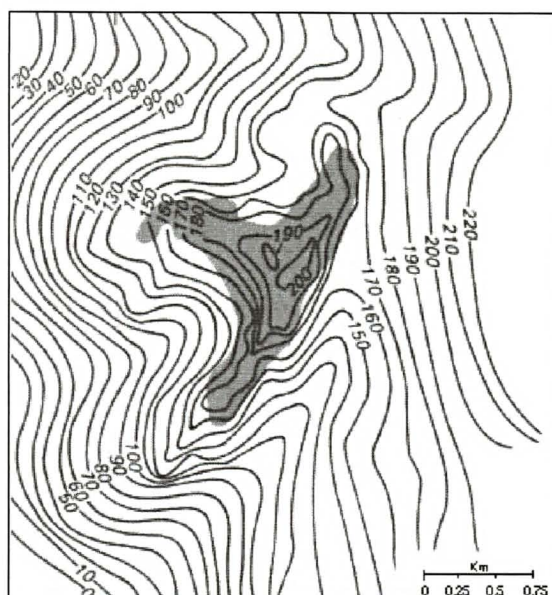


FIGURA 03 - Estrutura de fechamento mapeada em calcários da Formação Renault (Bacia de Illinois), que condicionou o campo Plummer (cinza). Os contornos são dados em pés (modif. de Noel 1979, In : Seyler e Cluff 1990).

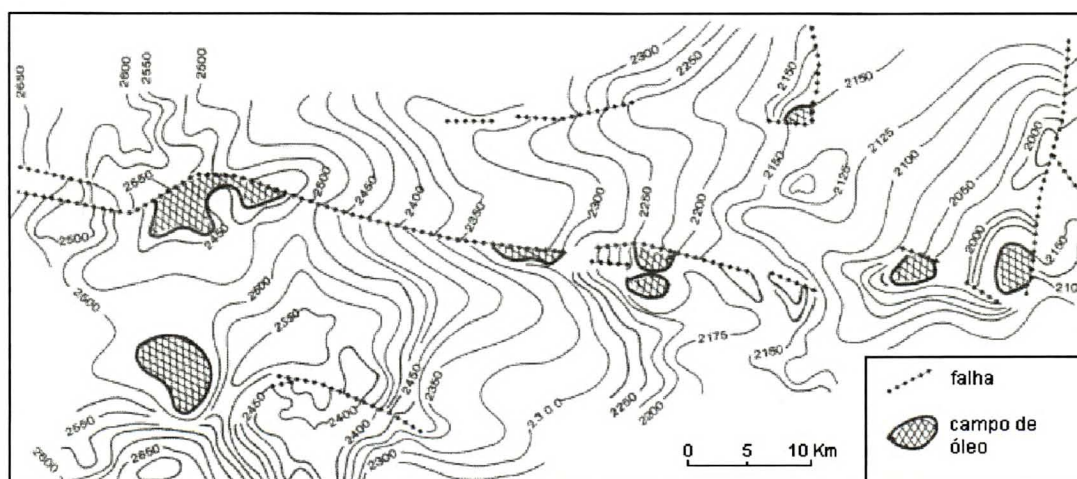


FIGURA 04 - Campos de óleo na Bacia do Báltico, alguns dos quais controlados por falhas. Os valores das curvas são de contorno estrutural (em metros) do topo da sequência produtiva (modif. de Gurov 1975, In : Ulmishek 1990).

É importante lembrar que os estilos estruturais gerados por diferentes mecanismos, podem ter atuado não somente como agentes aprisionadores de fluidos, mas também terem contribuído para a geração (na condução de calor e no aumento das taxas de subsidência), canalização (na condução de fluidos até a trapa) e performance do reservatório (causando aumento da pressão da água de formação e das taxas de produção). Por outro lado, processos de dobramentos, falhamentos e fraturamentos podem atuar também negativamente, destruindo trapas previamente formadas e dissipando os fluidos, ou ainda remobilizando-os para novas trapas.

Na Bacia do Paraná, um grande número de autores já se dedicou ao estudo de sua evolução tectônica e dos processos envolvidos na geração de estruturas (Soares *et al.* 1978; Almeida 1980; Ferreira 1982; Soares *et al.* 1982; Cordani *et al.* 1984; Zalán *et al.* 1987; Soares 1991; Milani 1997). A conclusão de maior consenso diz que as descontinuidades estruturais presentes no embasamento da bacia, desempenharam papel controlador de sua evolução tectônica e sedimentar.

A influência exercida por essas grandes estruturas no decorrer de toda evolução tectonossedimentar da bacia, certamente ficou materializada no registro sedimentar preservado. Cada sequência tectonossedimentar deve apresentar uma assembléia de estilos estruturais com arranjos e formas peculiares, que refletiriam os esforços exercidos durante os períodos de formação e modificação de cada uma. Algumas estruturas causaram importantes variações faciológicas nos períodos formacionais das sequências e outras, provocaram a justaposição lateral de diferentes unidades litoestratigráficas nos períodos modificadores.

Além do ponto de vista da importância das estruturas tectônicas como variável atuante na própria evolução da Bacia do Paraná, uma questão de ordem econômica naturalmente vem à tona : qual a relação que existe entre as estruturas e as acumulações de petróleo na bacia ?

Uma resposta à esta indagação poderia ser dada, caso o raciocínio fosse induzido a considerar a análise comparativa com as bacias similares produtoras, nas quais as estruturas associadas aos grandes lineamentos desempenharam papel importantíssimo no processo de acumulação-retenção do petróleo.

No entanto, fazendo-se uma rápida investigação das informações disponíveis dos programas exploratórios desenvolvidos na Bacia do Paraná, concluiu-se que a estratégia de locação dos quase 120 poços perfurados até o momento, não foi direcionada priorizando a existência das "grandes estruturas" reconhecidas na bacia, mesmo com a publicação de relatórios técnicos (Soares 1982; Zalán *et al.* 1986) trazendo informações a respeito da presença e importância dos estilos estruturais da bacia. Nesses trabalhos são feitas algumas recomendações para que o conhecimento adquirido sobre os estilos, fossem utilizados na exploração de trapas estruturais para hidrocarbonetos.

No início das atividades exploratórias da bacia (1892-1953) fizeram-se locações de poços rasos com menos de 1000 m, em áreas não cobertas pelos basaltos (Zalán *et al.* 1990), nas proximidades de ocorrências superficiais de óleo. Entre 1953 e 1974 a estratégia de locação dos 70 poços perfurados baseou-se em técnicas de mapeamento geológico e levantamentos geofísicos concentrados na borda leste da bacia; mais no final desse período foram analisadas anomalias de drenagem e padrões de fratura, com algum controle sísmico, resultando na descoberta de quatro acumulações sub-comerciais no estado de Santa Catarina. Um grande esforço exploratório marcou o período compreendido entre 1979 e 1982, com extensos levantamentos geofísicos e mapeamentos geológicos, além da aplicação de técnicas de análise morfoestrutural em imagens de satélite e radar, estudos geoquímicos e paleontológicos; duas descobertas sub-comerciais resumem os melhores resultados. Finalmente, a partir de 1986 a exploração caracterizou-se pelo emprego de tecnologias

avanzadas na aquisição e processamento de dados sísmicos resultando, em 1997, na descoberta da primeira acumulação comercial de gás no poço de Barra Bonita (PR).

1.2 ESTADO DA ARTE

Durante a pesquisa bibliográfica constatou-se a pequena quantidade de trabalhos científicos voltados ao estudo das relações existentes entre as estruturas tectônicas da bacia e as acumulações de hidrocarbonetos; maior ênfase a este tema foi dada a partir do programa exploratório do Consórcio Paulipetro. Quanto à aplicação de técnicas geoestatísticas para a identificação de paleolineamentos, pouquíssimos são os trabalhos publicados. Já a utilização de métodos quantitativos voltados à avaliação de favorabilidade em exploração, tem apresentado nos últimos anos um grande desenvolvimento, podendo-se tornar num futuro próximo uma prática auxiliar fundamental em qualquer campanha exploratória.

Um dos trabalhos pioneiros e marcantes que tratou de investigar as possibilidades petrolíferas da Bacia do Paraná foi o de Sanford e Lange (1960). Os autores tiveram como objetivo, elaborar um mapa de “áreas favoráveis” que serviria como guia para a exploração de óleo na bacia. Consideraram como fatores desfavoráveis à migração e acumulação do óleo :

- a) a falta de anticlinais e estruturas dobradas, b) os pequenos mergulhos regionais, c) a ausência de falhas reversas e, d) a atuação de várias fases de subsidência e soerguimento, que poderiam provocar o escape para a superfície, do óleo previamente acumulado. Como fatores favoráveis, citaram :
- a) a possibilidade de preservação de óleo em blocos de falha junto a diques, localizados abaixo da cobertura basáltica e, b) que os arenitos Botucatu poderiam servir de reservatórios para acumulação secundária, como consequência da migração de óleo após os derrames. Os autores concluíram, com base num mapa de ocorrências de óleo, que a zona de contato entre os arenitos basais do Grupo Itararé e folhelhos da Formação Ponta

Grossa, seria a mais favorável para exploração em toda bacia. Considerando diversos fatores geológicos, delimitaram uma área de 180.000 km² à qual foi atribuída a mais alta favorabilidade, em termos de paleogeografia e estruturas.

Outro trabalho interessante foi o de Oliveira (1971), que aplicou sólidos conceitos sobre geração e migração de petróleo à análise da Bacia do Paraná, concluindo que o pico ocorreu à época do magmatismo e que localmente, as intrusivas teriam provocado a geração.

Após a década de 70, trabalhos de mapeamento geológico de superfície, estudos de morfoestruturas em imagens de satélite e radar, levantamentos aeromagnetométricos e gravimétricos foram desenvolvidos tanto na Bacia do Paraná como em área do embasamento adjacente exposto. Com isso, foram identificados um grande número de elementos tectônicos, constituindo faixas estruturais com direções principais nordeste-sudoeste e noroeste-sudeste. Certas estruturas aflorantes no embasamento mostraram nítida continuidade para o interior da bacia e as reativações dessas, ao longo de sua história geológica, passaram a ser um tema bastante discutido pela comunidade científica.

Em diversos trabalhos os autores passaram a sugerir que o embasamento da bacia poderia ser comparado a um mosaico heterogêneo, no qual as peças seriam equivalentes a blocos litosféricos com dimensões variadas e os limites dessas peças equivaleriam à zonas de fraqueza (faixas estruturais), ao longo das quais os blocos tenderiam a se movimentar (Almeida 1980; Cordani *et al.* 1984; Zalán *et al.* 1987,1990 ; Soares 1991; Milani 1997). A reativação destas estruturas, em qualquer época, provocada por esforços nas bordas dos crátons, teria como reflexo na cobertura sedimentar o aparecimento de estilos estruturais característicos de áreas intracratônicas.

O atual arcabouço estrutural da Bacia do Paraná, definido por um arranjo de blocos limitados por falhas nordeste e noroeste teria, segundo Soares *et al.* (1982), importantes

implicações no que diz respeito à prospecção de estruturas com maior favorabilidade à acumulação de petróleo. Os autores acreditam que as falhas nordeste formariam barreiras à migração mergulho acima dos fluidos, e o arranjo das estruturas em forma de "X" constituiriam uma feição adequada para o trapeamento de hidrocarbonetos nos arenitos basais do Grupo Itararé; estas rochas estariam posicionadas em blocos baixos das estruturas e portanto, colocadas contra os folhelhos da Formação Ponta Grossa. Além deste prospecto, consideraram também interessante o posicionamento dos arenitos da Formação Rio Bonito em blocos altos, o que possibilitaria a disposição lado a lado com folhelhos da Formação Irati.

Outro estudo interessante, que foi desenvolvido ao final do programa exploratório do Consórcio Paulipetro (Soares 1982), envolveu a concepção de tectônica comparativa proposta por Harding e Lowell (1979). O objetivo foi identificar modelos para trapas de hidrocarbonetos, com base na utilização de feições estruturais diagnósticas, bem conhecidas e documentadas em bacias produtoras, deformadas de maneira similar. O estudo concluiu que os estilos estruturais mais interessantes seriam os domos assimétricos e flexuras sobre falhas verticais, com embasamento envolvido. Essas estruturas estariam alinhadas em *trends* paralelos à estrutura regional e seriam contemporâneas às fases de subsidência da bacia, constituindo ótimos prospectos para trapas estruturais, estratigráficas e mistas. O autor ressalta que as estruturas foram reativadas em fases posteriores de atividade tectônica, provocando o rearranjo de trapas, mais especificamente durante o magmatismo basáltico e o tectonismo subsequente. Finalmente, propõe para a Bacia do Paraná um modelo de prospecto para acumulações reagrupadas, no qual a migração vertical de fluidos estaria condicionada pela estruturação eo-cretácea; a presença de barreiras laterais (diques) e selantes concordantes (*sills*) às camadas causariam o aprisionamento desses fluidos, e formação de acumulações de óleo.

A partir dos resultados alcançados ao final do programa Paulipetro, Yoshida e Gama Jr. (1982) reavaliaram a potencialidade e prospectividade na Bacia do Paraná. Quanto à potencialidade, sugeriram que a presença de *sills* de diabásio influenciaram positivamente a ocorrência de acumulações de petróleo, durante os períodos de geração (calor), acumulação (fraturas) e também no selamento (com diques associados). Com base na ocorrência de gás em fraturas de diabásio no poço de Cuiabá Paulista (2-CB-1-SP) concluíram que a geração de hidrocarbonetos foi pós-vulcanismo, e que todas as estruturas formadas até o Jurássico apresentariam adequada relação temporal com a geração e migração de hidrocarbonetos.

A importância da tectônica compressional da margem convergente oeste do continente sul-americano foi ressaltada por Milani *et al.* (1990), ao avaliarem as possibilidades petrolíferas na "Calha Central" da Bacia do Paraná. Esta tectônica teria reativado lineamentos do embasamento da bacia propiciando, através da geração de falhas reversas, uma adequada disposição espacial entre os folhelhos geradores da Formação Irati e os arenitos da Formação Rio Bonito.

Alguns mecanismos de trapeamento e migração de hidrocarbonetos foram propostos por Milani e França (inédito), dentre os quais destacam-se : a) o contato entre os arenitos Furnas e os folhelhos Ponta Grossa, dado por anticlinais limitados por falha, gerados por falhamentos direcionais nordeste, com movimento lateral-esquerdo, de idade paleozóica; b) o contato direto entre os arenitos Itararé e os folhelhos Ponta Grossa, através de anticlinais relacionados a falhamentos reversos paleozóicos, ou ainda anticlinais relacionados a falhamentos direcionais noroeste, com movimentos lateral-direito, e c) contato entre os arenitos Rio Bonito e os folhelhos Irati, dado por *horsts* ou falhamentos normais associados à tectônica mesozóica. Sugerem ainda, que o mecanismo de migração vertical de hidrocarbonetos por meio de planos de falha e diques, poderia vir a aumentar o número de

situações para o trapeamento dos fluidos. Dão como exemplo os arenitos asfálticos da Formação Pirambóia, onde o óleo seria proveniente dos folhelhos Irati.

No tocante à utilização de métodos geoestatísticos, na Bacia do Paraná foi adotada a técnica de análise variográfica de dados de espessuras (Soares *et al.* 1982; Soares 1988), na tentativa de avaliar o controle dos paleolineamentos na sedimentação permo-carbonífera (Grupo Itararé e Grupo Guatá). Nestes trabalhos, constatou-se que paralelamente às direções estruturais, a variabilidade de espessura era menor que nas demais direções.

Em outro trabalho desenvolvido na bacia (Soares *et al.* 1993), os autores aplicaram um procedimento metodológico que associou análise de tendência, análise variográfica e estimativa por krigagem de dados da Formação Lagoa Azul e do Grupo Passa Dois (exclusive Formação Irati), visando a identificação de estruturas tectônicas, atuantes respectivamente, na fase inicial e final da sequência pensilvaniano-permiana. Os autores identificaram nos mapas gerados, altos estruturais encaixados na direção nordeste contemporâneos à sedimentação da fase inicial da sequência; já para o pacote superior, foram caracterizados altos estruturais alinhados na direção norte-noroeste, interpretados como resultantes da tectônica modificadora da sequência neopermiana.

Quanto aos métodos de quantificação aplicados à geologia exploratória, destacam-se as publicações de Rostirolla (1996, 1997) e Rostirolla *et al.* (1998). Nestes trabalhos é discutida uma metodologia que consiste em ponderar as variáveis diagnósticas da presença da mineralização/acumulação, quantificando-se seus graus de suficiência e necessidade, com o apoio de técnicas geomatemáticas e de modelagem de depósitos. Após o cálculo dos ponderadores para cada variável, os mapas ponderados são integrados espacialmente, e o resultado final passa a ser representado por um mapa de favorabilidade. Parte desta metodologia foi utilizada no presente trabalho.

1.3 OBJETIVOS E OBJETO DE ESTUDO

Todas as atividades desenvolvidas neste trabalho estiveram direcionadas para que o objetivo principal fosse alcançado. No entanto, primeiramente foram preestabelecidos alguns objetivos intermediários, necessários para atingir o principal :

- 1) identificar paleolineamentos estruturais ativos nos períodos de formação e modificação das sequências tectonossedimentares da Bacia do Paraná;
- 2) delimitar as áreas da bacia, onde ocorreu maior alojamento de rochas intrusivas em meio aos pacotes sedimentares, com o propósito de buscar possíveis associações com as ocorrências de petróleo;
- 3) caracterizar feições lineares do relevo gravimétrico, que poderiam indicar estruturas geológicas;
- 4) verificar o grau de similaridade entre os paleolineamentos aqui definidos e aqueles obtidos por outros métodos (gravimetria, aeromagnetometria, radar e satélite);
- 5) delimitar o macroambiente favorável à geração e preservação dos sistemas petrolíferos Ponta Grossa-Itararé e Irati-Rio Bonito/Tietê.

Ao cumprir estas etapas preliminares foi possível atingir o objetivo principal : definir a associação espacial entre paleolineamentos e acumulações de petróleo na Bacia do Paraná, demonstrando-se quantitativamente quais estruturas apresentam maior grau de correlação espacial com as ocorrências mais importantes.

Em função dos objetivos definidos, estabeleceu-se como objetos de estudo alguns atributos da Bacia do Paraná : as espessuras dos pacotes sedimentares e das intrusivas concordantes e os dados gravimétricos.

Primeiramente, nas atividades voltadas aos objetivos intermediários toda a área ocupada pela Bacia do Paraná foi considerada, para melhor compreender os fenômenos regionais associados aos objetos de estudo. Já numa segunda etapa foi delimitada uma área da bacia localizada em sua porção centro-sul (Figura 05), por tratar-se de um local de concentração dos esforços exploratórios e consequentemente, vindo a apresentar maior quantidade de dados e informações disponíveis. A área contém a grande maioria das ocorrências de hidrocarbonetos já conhecidas, além de todos os poços produtores.

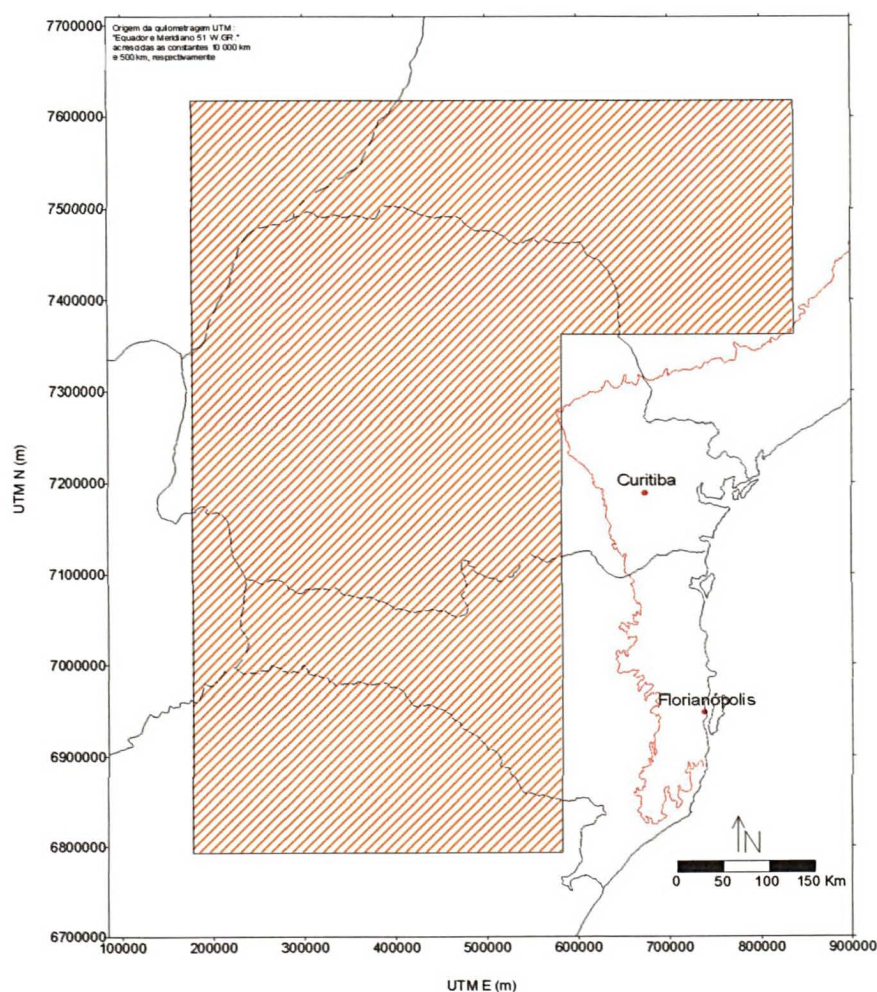


FIGURA 05 - Localização da área de concentração dos estudos.

2 TECTONO-ESTRATIGRAFIA E SISTEMAS PETROLÍFEROS

DA BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná (Figura 06) corresponde à uma entidade geotectônica instalada sobre terrenos proterozóicos da plataforma Sul-Americana, cuja evolução tectono-estratigráfica foi amplamente controlada por reativações de faixas estruturais presentes em seu embasamento (capítulo 2.1).

Em cada sequência tectonossedimentar da bacia (capítulo 2.2) ficaram impressas feições estruturais, geradas em períodos tectônicos distintos e portanto, uma assinatura estrutural particular deve ser esperada para cada uma.

A organização espaço-temporal das unidades estratigráficas e de suas estruturas tectônicas permitiu que houvesse a interação de eventos concentradores, que convergiram para a formação de acumulações de petróleo na bacia, caracterizando alguns sistemas petrolíferos (capítulo 2.3).

2.1 ESTRUTURAS DO EMBASAMENTO

O condicionamento tectônico às estruturas do embasamento é uma característica comum à todas as bacias intracratônicas. Diversos relatos descrevem os embasamentos dessas bacias como sendo constituídos por blocos crustais rígidos, limitados por zonas de fraqueza. Ao longo destas antigas faixas estruturais do embasamento, preferencialmente tenderiam a ocorrer movimentos desencadeados por esforços aplicados nas margens das placas tectônicas. Como já discutido no capítulo 1.1, em função das tensões a que foi submetida uma bacia, estilos estruturais particulares ficariam registrados em suas unidades rochosas constituintes.

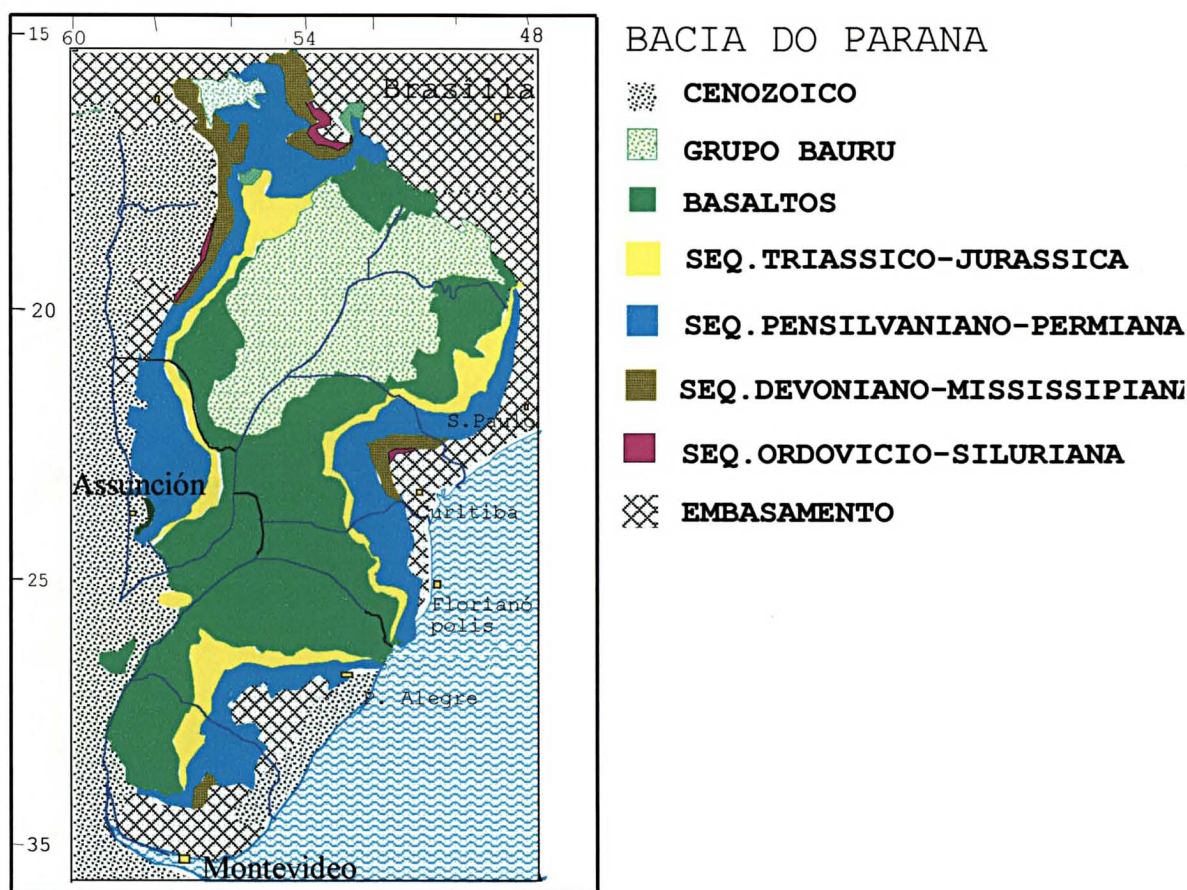


FIGURA 06 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná. As denominações das unidades pré-basalto foram propostas por Soares (1991). Figura de Soares (*inédito*).

Vários são os autores que destacam a diversidade litológica, deformacional e geocronológica apresentada pelos terrenos que constituem o embasamento exposto da Bacia do Paraná. Em meio a este complexo arranjo espacial podem ser individualizadas entidades crustais de naturezas distintas, as quais foram submetidas a processos tectono-termiais do Neoproterozóico-Eopaleozóico; tais processos são considerados como responsáveis pela configuração adquirida pelo embasamento da bacia, anteriormente ao início da sedimentação cratônica.

Uma série de blocos crustais circundados por cinturões móveis orogênicos, além de algumas coberturas de metassedimentos molássicos, constituem o embasamento aflorante da Bacia do Paraná.

Na margem leste/sudeste da bacia aparecem dois cinturões móveis brasileiros com direção geral nordeste, denominados Cinturão Dom Feliciano (Faixas Porongos e Tijucas) e Cinturão Ribeira (Faixa Apiaí), os quais justapõem blocos crustais mais antigos (Proterozóico Inferior e Arqueano), correspondentes ao Maciço de Curitiba-Joinville, ao Complexo Luís Alves e, possivelmente, ao Cráton Rio da Prata. Quanto às principais estruturas lineares identificadas nestas unidades e que adentram nitidamente por sob a Bacia do Paraná, destacam-se as seguintes zonas de cisalhamento com direção ENE : Major Gercino-Ganguçu-Sierra Balena, no Cinturão Dom Feliciano; Jacutinga-Inconfidentes-Ouro Fino e Cubatão-Caucaia-Lancinha-Serra do Mar, ambas embutidas no Cinturão Ribeira.

Na margem norte/nordeste aparece um cinturão móvel de idade uruaçuana (Proterozóico Médio) e com direção noroeste, denominado Cinturão Brasília-Uruaçu (grupos Araxá e Canastra), além de dois maciços de rochas arqueanas, isotopicamente remobilizadas no Ciclo Brasileiro, correspondentes aos maciços de Guaxupê e Goiano.

Na margem oeste/noroeste ocorre o Cinturão Paraguai-Araguaia, que bordeja toda o limite ocidental da bacia, apresentando direção geral norte-sul. Esta estrutura interliga-se ao Cinturão Brasília-Uruaçu, delimitando a borda norte da bacia.

A extensão das unidades e estruturas visualizadas no embasamento aflorante por sob os depósitos da Bacia do Paraná, é fato reconhecido por vários autores (Almeida 1980; Soares *et al.* 1982; Brito Neves *et al.* 1984; Cordani *et al.* 1984; Zalán *et al.* 1987, entre outros). No entanto, grandes controvérsias surgem quando a seguinte questão é levantada : como se distribuem espacialmente os cinturões, faixas e crátons que adentram por sob a bacia ?

Com base em dados litológicos provindos de poços para petróleo, além de dados gravimétricos, aeromagnéticos e de geologia de superfície, alguns autores já esboçaram as possíveis configurações do arcabouço tectônico do embasamento encoberto da bacia. Uma delas, proposta por Soares (*inédito*), está ilustrada na Figura 07.

A partir da análise de dados de poços, Soares *et al.* (1982) definiram quatro principais domínios lito-estruturais do embasamento: 1) granitos róseos e sienitos; 2) migmatitos; 3) rochas metamórficas (xistos, gnaisses e quartzitos) e; 4) rochas molássicas (arenitos, conglomerados, siltitos e brechas). As rochas metamórficas foram agrupadas em faixas com direção nordeste e associadas a blocos ou faixas tectônicas mapeadas em afloramentos.

Uma questão bastante intrigante diz respeito à uma importante peculiaridade do embasamento encoberto da Bacia do Paraná, que vem sendo discutida desde Fyfe e Leonardos (1974) até Milani (1997). Trata-se da possibilidade da presença de um bloco cratônico na porção centro-oeste da bacia, denominado "núcleo cratônico" por Cordani *et al.* (1984) e "Bloco Paraná" por Soares *et al.* (1982), ao redor do qual teriam se desenvolvido os cinturões móveis brasileiros. No entanto, com o apoio de dados e informações geológicas e geofísicas mais recentes, Milani (1997) sugeriu que o conceito de "núcleo cratônico" deveria deixar de existir, dando lugar à três novas entidades geotectônicas as quais denominou : "bloco do Rio Aporé" e "bloco do Rio Paranapanema", justapostos pela "faixa móvel do Rio Paraná". Segundo este autor, a "faixa móvel do Rio Paraná" que apresenta direção geral nordeste, teria sido o elemento estrutural controlador do início da sedimentação Neo-Ordoviciano, inclusive com magmatismo associado (basalto Três Lagoas).

No capítulo 6.1.7 são apresentados os resultados obtidos a partir do tratamento dos dados gravimétricos, onde poderá se constatar a predominância de estruturas lineares com direção nordeste, provavelmente refletindo descontinuidades do embasamento da bacia.

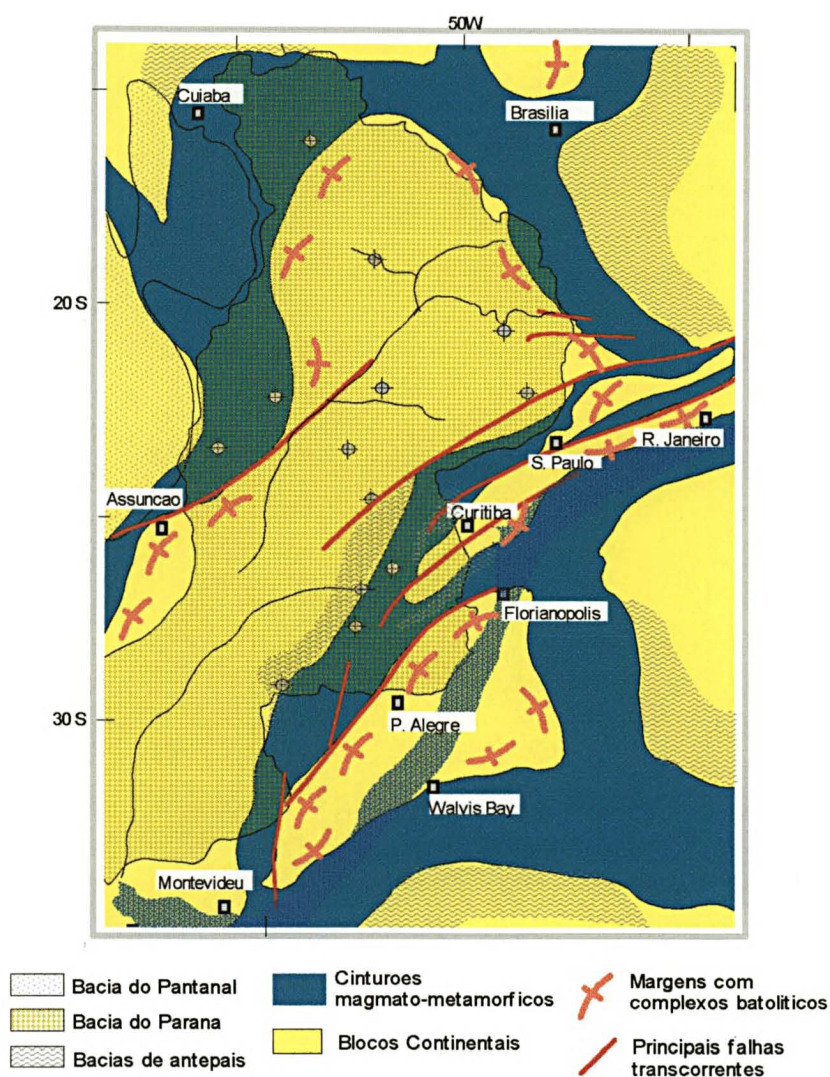


FIGURA 07 - Representação dos principais blocos continentais e cinturões colisionais, posicionados sob e em torno da Bacia do Paraná (Soares *inédito*).

2.2 SEQUÊNCIAS TECTONOSSEDIMENTARES

Com base nos conceitos introduzidos por Sloss *et al.* (1949) e Sloss (1963), Soares *et al.* (1978) analisaram a evolução tectônica das bacias intracratônicas brasileiras, e reconheceram seis grandes sequências (Alfa, Beta, Gama, Delta, Delta-A, Épsilon e Zeta), intimamente correlatas àquelas definidas por Sloss no continente norte-americano. Sucessivos eventos de subsidência e soerguimento nessas bacias caracterizam os ciclos tectonossedimentares, e as sucessivas sequências estratigráficas representam os sedimentos depositados em cada um dos ciclos, nos períodos em que as áreas bacinais encontravam-se abaixo do nível de base de erosão. Soares (1991) reavaliou conceitualmente as sequências definidas por Soares *et al.* (1978) para a Bacia do Paraná, e adotou o termo *sequência tectonossedimentar* para definir o registro estratigráfico limitado por grandes discordâncias regionais.

Uma outra classificação foi proposta por Zalán *et al.* (1987), os quais fatiaram o registro estratigráfico da bacia em cinco sequências maiores (no sentido de Chang 1975), denominando-as informalmente de *Silurina*, *Devoniana*, *Permo-Carbonífera*, *Triássica* e *Juro-Cretácica*.

Na análise estratigráfica efetuada em bacias implantadas em interior cratônico, como é o caso da Bacia do Paraná, os conceitos e critérios da moderna estratigrafia de sequências, desenvolvidos inicialmente em bacias de margem passiva, têm sido adaptados por diversos autores. Recentemente, Milani (1997) analisou a evolução geológica da Bacia do Paraná sob a ótica da estratigrafia de sequências, e considerou que o registro estratigráfico preservado formou-se graças à interação entre as movimentações do substrato da bacia e as oscilações eustáticas do nível do mar. A ação conjunta destas duas variáveis provocaram, segundo o autor, variações cíclicas do espaço de acomodação sedimentar.

A classificação proposta por Milani (1997), compreende seis supersequências no sentido de Vail *et al.* (1977), limitadas por superfícies de discordância de caráter interregional. Foram atribuídas à elas as seguintes denominações : *supersequências Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru.*

Nos parágrafos seguintes serão apresentados os principais aspectos estratigráficos e estruturais das quatro sequências tectonossedimentares que compõem o registro pré-basalto da Bacia do Paraná (Figura 06; Soares 1991), sempre procurando correlacioná-las às demais classificações apresentadas acima. As Figuras 08 a 11 foram criadas com base em informações de bibliografia citada ao longo deste capítulo.

Sequência Tectonossedimentar Ordovício-Siluriana

Os sedimentos ordovício-silurianos mostram-se amplamente distribuídos na Bacia do Paraná, apresentando maior preservação a oeste (Mato Grosso do Sul e Paraguai); os afloramentos são muito escassos e descontínuos, localizados nas bordas atuais da bacia. Descrições bastante detalhadas desta sequência são encontradas em Assine *et al.* (1994), Assine (1996) e Milani (1997).

A superfície basal da sequência corresponde à primeira discordância cratônica do Fanerozóico, situando-se temporalmente no Ordoviciano Médio (458 - 478 Ma ; Soares 1991). Dependendo da posição na bacia, o contato basal pode ser dado por qualquer uma das três unidades litoestratigráficas constituintes desta sequência (formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria), em discordância litológica ou angular com rochas pré-cambrianas ou eopaleozóicas. As três unidades constituem o chamado Grupo Rio Ivaí (Figura 08) de Assine *et al.* (1994).

Os siltitos basais da Formação Vila Maria correspondem à uma superfície de máxima inundação marinha (SMI), e com base em seu conteúdo fóssilífero esta unidade é posicionada

no Llandoveryano (Eossiluriano). Já os tilitos da Formação Iapó são o registro da primeira glaciação da história evolutiva da Bacia do Paraná.

Os depósitos formadores desta sequência constituem o primeiro grande ciclo transgressivo-regressivo documentado na bacia (Milani 1997). Soares (1991) sugere que a preservação isolada destes depósitos, o contato discordante com a Formação Furnas e a deformação verificada em depósitos da Formação Iapó, são feições indicativas de uma atividade tectônica formadora e modificadora de grande amplitude.

Esta sequência equivale à Sequência Beta de Soares *et al.* (1978), à parte basal da Sequência Siluriana de Zalán *et al.* (1987) e à Supersequência Rio Ivaí de Milani (1997).

Sequência Tectonossedimentar Devoniano-Mississippiana

Apresenta-se bem desenvolvida e com boa continuidade lateral na bacia. Descrições detalhadas desta sequência são encontradas em Mühlmann *et al.* (1974), Assine (1996) e Milani (1997).

Assenta-se discordantemente sobre rochas de diferentes idades, desde unidades pré-cambrianas/eopaleozóicas até unidades ordovício-silurianas do Grupo Rio Ivaí (Assine 1996), sendo constituída pelas formações Furnas e Ponta Grossa (Figura 09). A idade da discordância inferior foi posicionada por Soares (1991) entre o Siluriano Inferior (Llandoveryano) e o início do Devoniano (415 - 400 Ma).

Os folhelhos pretos fossilíferos dos membros Jaguariaíva e São Domingos (Formação Ponta Grossa) correspondem à duas S₂MI, respectivamente de idades Emsiana-Eifeliana e Givetiana-Frasniana (Soares 1991).

A sucessão de estratos que compõem esta sequência corresponde ao registro de um ciclo transgressivo-regressivo assimétrico, sendo que o pacote da sequência regressiva

encontra-se localmente preservado (Milani 1997). Na análise de sequências efetuada por Soares (1991), o autor constatou a influência de tectonismo contemporâneo ao início da sedimentação devoniana e durante a deposição dos arenitos Tibagi, além de bons indicadores de tectônica modificadora da sequência, associada às estruturas com direção nordeste.

Corresponde à Sequência Gama de Soares *et al.* (1978), à parte superior da Sequência Devoniana de Zalán *et al.* (1987) e à Supersequência Paraná de Milani (1997).

Sequência Tectonossedimentar Pensilvaniano-Permiana

Corresponde à sequência melhor desenvolvida na bacia, chegando a atingir 2.500 m de espessura de sedimentos. Descrições detalhadas desta sequência são encontradas em Mühlmann *et al.* (1974), Gama Jr. (1979), França e Potter (1988;1991), Castro (1991), Lavina (1991) e Milani (1997).

A discordância pré-Pensilvaniana omite por erosão espessos pacotes da Sequência Devoniana-Mississippiana (Soares 1991), caracterizando-se por ser a discordância regional de maior hiato no registro litológico da Bacia do Paraná, estimado por Daemon *et al.* (1991) em cerca de 55 Ma. Estudos palinológicos realizados na porção inferior da sequência (Daemon e França 1993), indicam que a sedimentação teve início no Westphaliano (290-310 Ma). Quanto ao posicionamento geocronológico da seção superior, há uma discussão entre aqueles que a consideram pertencente ao Neopermiano, e os que a estendem até o Triássico. Os estratos basais desta sequência assentam-se sobre rochas da sequência sotoposta ou sobre rochas pré-cambrianas/eopaleozóicas. Litoestratigraficamente, é constituída pelos grupos Itararé, Guatá e Passa Dois (Figura 10).

Nesta sequência, Soares (1991) demarcou as principais superfícies de máxima inundação, que correspondem a horizontes estratigráficos correlacionáveis por toda a bacia.

Os folhelhos acinzentados e fossilíferos Capivari-Lontras e Passinho situados, respectivamente, nos topos das formações Campo Mourão e Taciba, apresentam respectivas idades Eo-Sakmariana e Neo-Sakmariana. Ao longo do Grupo Itararé este mesmo autor destaca a atuação de quatro eventos glaciais de escala regional.

No Grupo Guatá são identificadas mais duas S₅MI que correspondem aos siltitos fossilíferos, situados entre as porções média e superior do Membro Paraguaçu (Formação Rio Bonito) e a correspondente aos folhelhos e siltitos acinzentados e fossilíferos da Formação Palermo-Tatuí Superior; esta superfície, correspondente ao "marco K" de Daemon e Quadros (1970), ocorre a poucas dezenas de metros acima da anterior.

No Grupo Passa Dois ocorre uma SMI no topo do Membro Taquaral (Formação Irati), marcada por folhelhos cinza, fossilíferos, de idade Kasaniana e outra aparece, aproximadamente, na metade da Formação Serra Alta, caracterizada por folhelhos escuros e fossilíferos.

A partir da SMI localizada na Formação Palermo, a sedimentação dessa sequência passou a apresentar características regressivas, culminando com a entrada de sedimentos exclusivamente continentais na bacia (Formação Rio do Rastro/Sanga do Cabral).

No que diz respeito à evolução tectônica desta sequência, Soares (1991) identificou uma série de "sequências gradacionais", e a partir de seu rastreamento pela bacia fez algumas considerações : a sedimentação da base da sequência foi restrita à baixos tectônicos precursores, havendo uma estabilização tectônica a partir do horizonte Capivari-Lontras até a sedimentação pré-Passinho; a partir daí, a bacia foi submetida a intensos processos de falhamento nordeste, que foram responsáveis pelo controle faciológico das unidades Passinho e Triunfo, além de provocar a "disconformidade pré-Tatuí" no norte do Paraná e São Paulo; a

partir do Membro Paraguaçu até o limite superior da sequência, os indícios de movimentos tectônicos tornam-se mais fracos.

Esta sequência tectonossedimentar corresponde à Sequência Delta de Soares *et al.* (1978), à Sequência Permo-Carbonífera de Zalán *et al.* (1987) e à uma parte da Supersequência Gondwana I de Milani (1997).

Sequência Tectonossedimentar Triássico-Jurássica

É constituída em sua porção inferior, por depósitos continentais de clima árido (Soares 1991) classificados, litoestratigraficamente, como formações Pirambóia e Santa Maria; caracterizam-se pela coexistência faciológica de sedimentos fluviais e eólicos (Assine 1993). A porção superior apresenta o registro de uma sedimentação predominantemente eólica, constituindo a Formação Botucatu. Suas principais características são mostradas na Figura 11. Descrições detalhadas podem ser encontradas em Soares (1975) e Lavina (1991).

As relações de contato com os sedimentos permianos continuam gerando muitas controvérsias; no entanto, a maioria dos autores considera como discordante. Já o contato Pirambóia/Botucatu é reconhecido por alguns como concordante, localmente caracterizado por diastemas, e por outros como discordante, com a separação de duas sequências distintas. Soares (1991) relata que as primeiras "sequências gradacionais" desta sequência foram depositadas em pequenos baixos tectônicos. Corresponde à porção inferior da Subsequência Delta-A de Soares *et al.* (1978), à Sequência Triássica mais a porção inferior da Sequência Juro-Cretácea de Zalán *et al.* (1987) e à porção superior da Supersequência Gondwana I mais a Supersequência Gondwana II de Milani (1997).


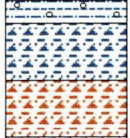

Geocronologia		Unidades Litoestratigráficas	Perfil Esquem.	Descrição Litológica Simplificada	Interpretação Paleoambiental	Áreas de Ocorrência
Per.	Época					
SILURIANO	428 Ma	Grupo Rio Ivaí	DDDDDDDDDD			
	LLANDOVERIANO	Formação Vila Maria		folhelhos e siltitos fossilíferos, geralmente avermelhados, superpostos por arenitos finos com intercalações de siltitos.	Conglomerados e arenitos basais depositados em ambiente transicional (<i>braided deltas</i>), sucedidos por arenitos marinhos plataformais com retrabalhamento por marés (Fm. Alto Garças).	PR, MT, MS, GO e Paraguai (Fm. Vargas Peña)
ORDOVICIANO	438 Ma	Formação Iapó		diamictitos polimíticos com matriz arenosa, avermelhados, superpostos por diamictitos polimíticos com matriz siltico-arenosa, cinza azulados; intercalações ocasionais de folhelhos e arenitos. No topo aparecem lamitos com seixos pingados.	Sucedem-se, após um evento de discordância, depósitos subglaciais seguidos por depósitos glaciogênicos continentais, com influência marinha.	PR, SP, SC, MS, GO
	ASHGILLIANO	DDDDDDDDDD				
	446 Ma	Formação Alto Garças		conglomerados basais, sucedidos gradualmente por arenitos conglomeráticos brancos e arenitos finos a médios no topo.	No topo da sequência há o registro de pelitos basais depositados em plataforma externa (<i>offshore</i>) abaixo do nível das ondas de tempestade, e arenitos de topo depositados em plataforma interna rasa dominada por ondas.	MT, MS, GO, SP, PR, SC, RS, Paraguai (Gr. Caacupé).
	CARADOCIANO	DDDDDDDDDD				
	450 Ma					

FIGURA 08 - Quadro-resumo das principais características litológicas e paleoambientais do Grupo Rio Ivaí.

Geocronologia		Unidades Litoestratigráficas	Perfil Esquem.	Descrição Litológica Simplificada	Interpretação Paleambiental	Áreas de Ocorrência		
Per.	Época							
DEVONIANO	SUPERIOR	Grupo Paraná	Formação Ponta Grossa	DDDDDD	<p>folhelhos de cor cinza, fossilíferos, às vezes betuminosos, com intercalações de arenitos finos.</p> <p>arenitos finos a muito finos, fossilíferos, com intercalações de folhelhos silticos.</p> <p>folhelhos silticos fossilíferos, passando a folhelhos pretos com altos teores de matéria orgânica.</p> <p>arenitos médios a muito grossos com escassos níveis silto-argilosos. Para o topo ocorre maior número de intercalações de siltitos fossilíferos (Camadas de Transição).</p> <p>arenitos finos a grossos, com intercalações de níveis silto-argilosos.</p> <p>arenitos médios a muito grossos, com intercalações de conglomerados e arenitos conglomeráticos.</p>	<p>Os sedimentos da Formação Furnas foram depositados em condições transgressivas, com <i>onlap</i> costeiro de oeste para leste. O trato deposicional é o de sistemas de deltas construídos por rios entrelaçados (<i>braided deltas</i>). Em direção ao topo da unidade há aumento da influência marinha.</p> <p>Os sedimentos do Membro Jaguariaíva foram depositados em plataforma terrígena rasa, num momento de afogamento dos sistemas deltaicos da Formação Furnas; a continuação da transgressão (que atingiu o máximo com a deposição dos folhelhos São Domingos) foi interrompida temporariamente pelo avanço de sistemas deltaicos provindos de leste e sudeste, resultando na deposição dos arenitos Tibagi.</p>	MT, MS, GO, MG, SP, PR, SC, Paraguai e Argentina.	
	MÉDIO			Mb. São Domingos				
				Mb. Tibagi				
			Mb. Jaguariaíva					
	INFERIOR		390 Ma	Formação Furnas				
			410Ma					DDDDDD

FIGURA 09 - Quadro-resumo das principais características litológicas e paleoambientais do Grupo Paraná.

Geocronologia		Unidades		Perfil	Descrição Litológica Simplificada	Interpretação	Áreas de
Per.	Ép. / Id.	Litoestratigráficas	Esquem.				
PERMIANO	250 Ma	Tatari-ano	GR. PASSA DOIS	DDDDDDDDDD	siltitos esverdeados a arroxeados, com intercalações de argilitos, arenitos finos e níveis carbonáticos (Fm. R. do Rastro - Mb. Serrinha), superpostos por argilitos e siltitos vermelhos, contendo intercalações de arenitos finos (Mb. Morro Pelado). No Rio Grande do Sul ocorre a Formação Sanga do Cabral.	As unidades do Grupo Itararé correspondem a três eventos cíclicos glaciogênicos, materializados por depósitos com granodecrescência ascendente, formados por sucessivas progradações deltaicas (mar baixo) seguidas por afogamentos (degelo). A sedimentação ocorreu sob influência de mudanças climáticas cíclicas dentro do regime glacial, associadas à variações do nível relativo do mar (glaciações/deglaciações).	MT, MS, GO, SP, PR, SC, RS
	Fm. Rio do Rastro						
	Fm. Teresina						
	Kazaniano	Kunguri-ano	GR. GUATÁ	Fm. Serra Alta	alternâncias de siltitos e arenitos muito finos, de cor cinza clara, intercalados com calcários fossilíferos (Fm. Teresina).	Em seguida houve a entrada de sistemas deltaicos dominados por rios (Fm. Rio Bonito), recobrimdo sedimentos glaciomarinhos do Itararé; devido à tendência retrogradacional da sequência, ocorrem níveis marinhos em meio à seção deltaica. A transgressão culmina com a deposição de pelitos da Fm. Palermo, seguida por condições deposicionais progressivamente mais rasas, em ambiente do tipo golfo (Fm. Irati). Acima do Irati, implantou-se um ambiente marinho de baixa energia (Fm. Serra Alta), sucedendo-se depósitos influenciados pela ação de marés (Fm. Teresina). A sequência é encerrada com a instalação de um complexo progradacional, que inclui lobos deltaicos, pelitos lacustres, arenitos eólicos e raros depósitos fluviais (Fm. Rio do Rastro).	
	Fm. Irati			argilitos, folhelhos e siltitos, fossilíferos, cinza escuros a pretos (Fm. Serra Alta).			
	Fm. Palermo			argilitos, folhelhos e siltitos, fossilíferos, cinza escuros (Fm. Irati - Mb. Taquaral) sucedidos por folhelhos escuros e folhelhos pirobetuminosos fossilíferos, associados a calcários (Mb. Assistência).			
	Artins-kiano	Sakmari-ano	GR. ITARARÉ	Fm. Rio Bonito	siltitos e siltitos arenosos de cor cinza, e localmente arenitos finos e conglomeráticos (Fm. Palermo).		MT, MS, GO, SP, PR, SC, norte RS
Fm. Taciba	arenitos finos e médios, localmente grossos, com níveis de carvão subordinados (Fm. Rio Bonito-Mb. Triunfo), passando para siltitos e folhelhos cinza, intercalados com camadas de arenitos finos e níveis carbonáticos (Mb. Paraguaçu); no topo aparecem arenitos finos a muito finos, cinza escuros, intercalados com níveis de argilitos e folhelhos carbonosos (Mb. Siderópolis).						
Fm. Campo Mourão	arenitos finos argilosos, cinza claros, superpostos por folhelhos e diamictitos (Gr. Itararé - Fm. Lagoa Azul); acima desses, ocorrem arenitos médios a grossos e conglomerados superpostos por siltitos, folhelhos e diamictitos (Fm. Campo Mourão); no topo aparecem arenitos grossos com intercalações de folhelhos e conglomerados, seguidos por diamictitos cinzentos com intercalações de arenitos finos (Fm. Taciba).						
PENSILVANO	Estepha-niano	GR. ITARARÉ					sul SP, PR, norte SC
	Westpha- -liano			Fm. Lagoa Azul			
	310Ma			DDDDDDDDDD			

FIGURA 10 - Quadro-resumo das principais características litológicas e paleoambientais dos grupos Itararé, Guatá e Passa Dois.

Geocronologia		Unidades Litoestratigráficas	Perfil Esquem.	Descrição Litológica Simplificada	Interpretação Paleoambiental	Áreas de Ocorrência
Per.	Limites					
JURÁSSICO	135 Ma	Grupo São Bento				
			Formação Botucatu	arenitos avermelhados, finos a médios, normalmente bimodais; na porção inferior podem ocorrer níveis de arenitos argilosos e também arenitos grossos a conglomeráticos.	A Formação Pirambóia caracteriza-se pela sedimentação arenosa flúvio-eólica, submetida à condições de clima árido. Nos baixios inter-distributários depositaram-se sedimentos pelíticos. Os depósitos da Formação Santa Maria são considerados como sendo de origem lacustre. Por sobre este pacote avançaram sedimentos continentais da Formação Botucatu, representados predominantemente por fácies eólicas, como <i>ergs</i> e <i>wadis</i> .	MT, MS, GO, MG, SP, PR, SC, RS
	150 Ma		Formação Pirambóia	arenitos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, médios a muito finos, com intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos (Fm. Pirambóia). No Rio Grande do Sul ocorre a Fm. Santa Maria, constituída por argilitos silticos e siltitos arenosos, vermelhos, fossilíferos.		
TRIÁSSICO						
	235 Ma ?					

FIGURA 11 - Quadro-resumo das principais características litológicas e paleoambientais do pacote sedimentar do Grupo São Bento.

2.3 SISTEMAS PETROLÍFEROS

O conceito de sistema petrolífero evoluiu a partir dos estudos desenvolvidos por Dow (1972) na Bacia de Williston, tornando-se uma ferramenta exploratória eficiente e apreciada pela indústria do petróleo. Apresenta dimensões menores que uma província petrolífera, porém maiores que um *play*, o que o torna um conceito aplicável nas atividades regionais de exploração (Magoon e Sánchez 1995).

Na definição de Demaison e Huizinga (1991) o sistema petrolífero constitui um sistema físico-químico dinâmico, gerador e concentrador de petróleo, cuja funcionalidade se dá numa determinada escala de tempo e espaço geológicos. Magoon e Dow (1994) recomendam delimitar num sistema, a sua extensão geográfica e estratigráfica : a primeira corresponde à área da bacia, que inclui desde a janela de geração até a trapa, e a segunda refere-se à seção sedimentar que contém os elementos essenciais à formação de uma acumulação (Figura 12).

Para produzir uma acumulação, o sistema requer a convergência temporal de certos eventos e elementos geológicos essenciais (Nijhuis e Baaak 1990; *apud* Demaison e Huizinga 1991), os quais estão sumariados na Figura 13. Uma ilustração esquemática do funcionamento de um sistema formador de hidrocarbonetos é apresentada na Figura 14.

Na Bacia do Paraná as atividades exploratórias desenvolvidas até o momento, proporcionaram a identificação de seis sistemas petrolíferos. No entanto, algumas funções desses sistemas são muito pouco compreendidas, principalmente àquelas relacionadas aos mecanismos de migração e trapeamento. Os sistemas são aqui identificados, com base nos nomes de suas unidades litoestratigráficas geradoras e acumuladoras : 1) Sistema Petrolífero Vila Maria - Alto Garças; 2) Sistema Petrolífero Vila Maria - Furnas; 3) Sistema Petrolífero Ponta Grossa - Furnas; 4) Sistema Petrolífero Ponta Grossa - Itararé; 5) Sistema Petrolífero

Irati - Rio Bonito/Tietê e; 6) Sistema Petrolífero Irati - Pirambóia. Mais recentemente, um sétimo sistema petrolífero (Ponta Grossa-Rio Bonito) foi identificado na região do poço de Barra Bonita, inclusive mostrando bons resultados. Apesar dessas várias possibilidades de geração/acumulação, as ocorrências mais significativas, incluindo todas as acumulações sub-comerciais e a comercial recentemente descoberta (Barra Bonita), foram encontradas nos sistemas Ponta Grossa - Itararé e Irati - Rio Bonito.

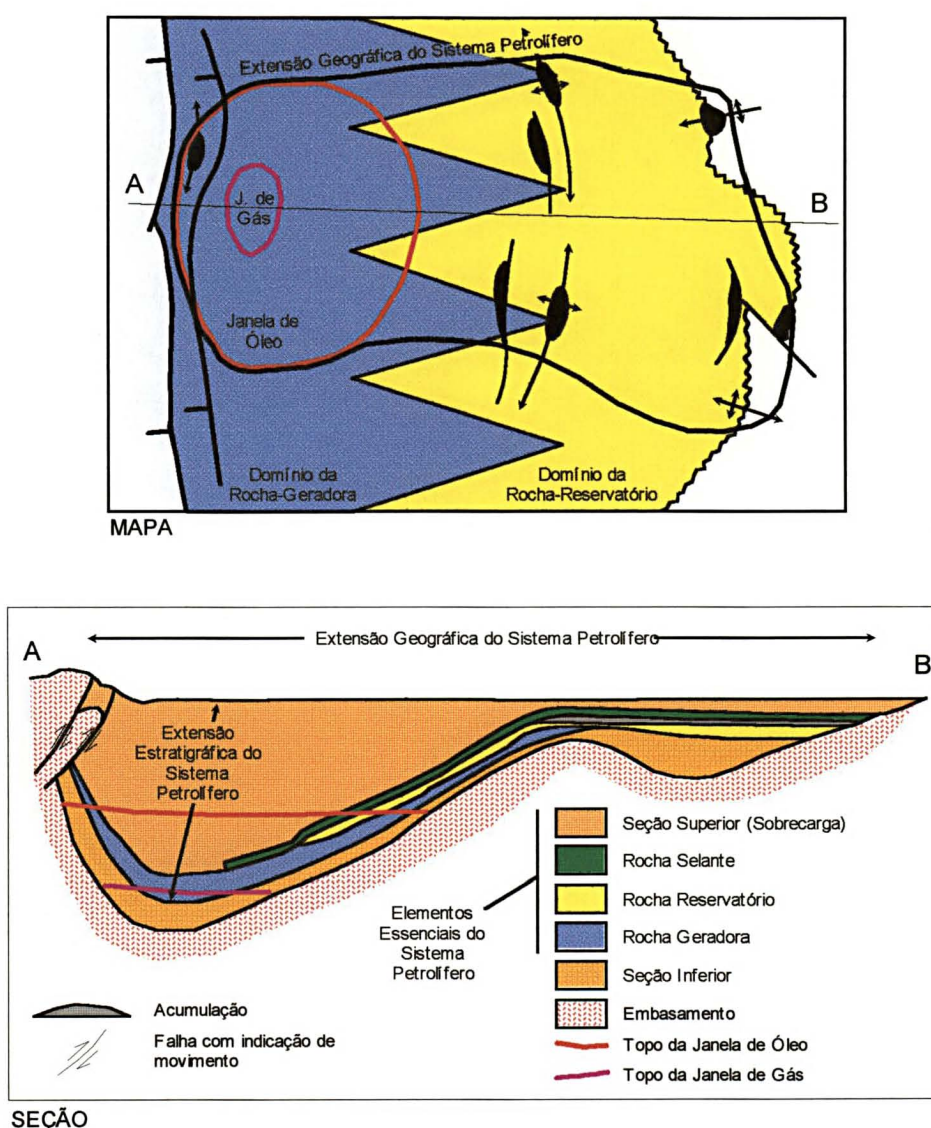


FIGURA 12 - Delimitação geográfica (acima) e estratigráfica (abaixo) de um sistema petrolífero (Magoon & Dow 1994, modificado por Rostirolla 1996).

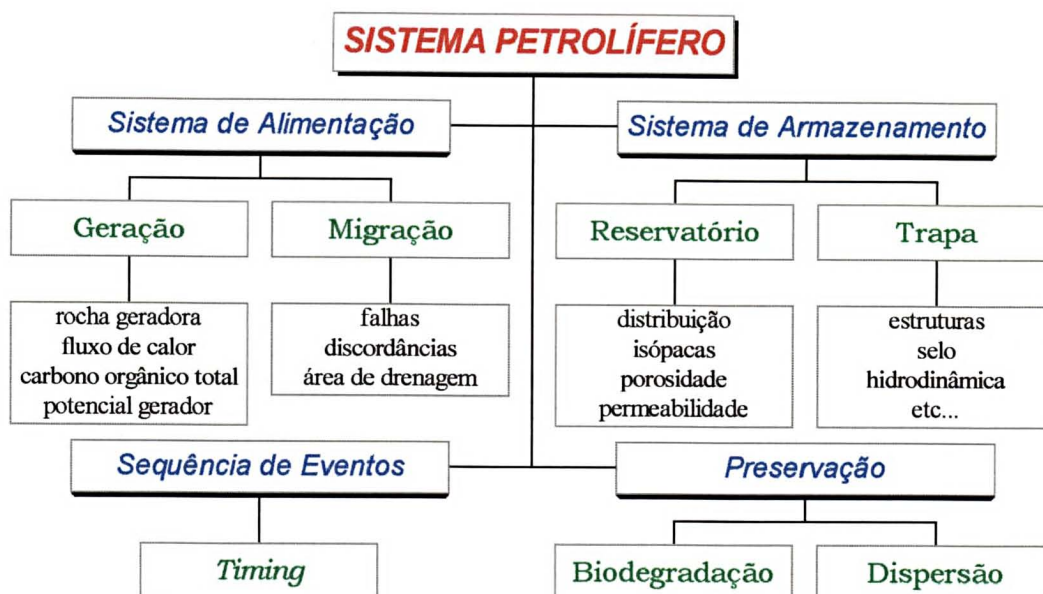


FIGURA 13 - Organograma de um sistema petrolífero. Os elementos ligados ao sistema de alimentação e de armazenamento correspondem ao conjunto de evidências geológicas indicadoras dos processos formadores de acumulações de petróleo (adaptado de Rostirolla 1996).

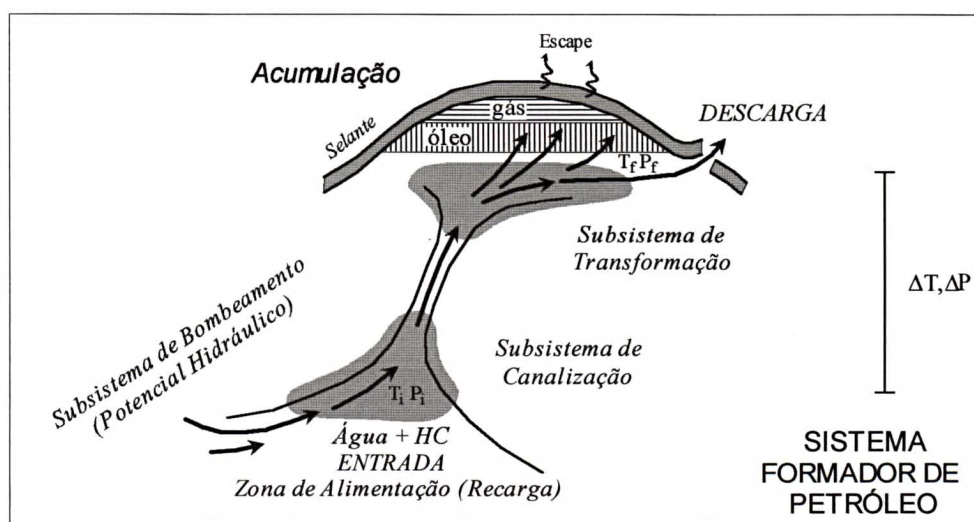


FIGURA 14 - Esquema simplificado do funcionamento de um sistema petrolífero, mostrando os subsistemas componentes e as transferências de matéria e energia (Rostirolla *et al.* 1996).

As rochas geradoras com melhor potencial na bacia são encontradas em folhelhos escuros das formações Irati e Ponta Grossa. A primeira reúne condições de geração apenas nas porções centro-oeste da bacia, onde estaria dentro da janela de geração de óleo; localmente pode encontrar-se em estado de maturidade ou supermaturidade, caso venha a ocorrer associada à rochas intrusivas. Estimativas efetuadas por Zalán *et al.* (1990) mostram que a Formação Irati atingiria a zona supermatura, caso a espessura cumulativa de *sills* nesta unidade, fosse superior a 30 m. Dados geoquímicos indicam que os folhelhos do Membro Assistência são os melhores geradores da bacia (Zalán *et al.* 1990), tendo-se verificado a sua afinidade geoquímica com todas as ocorrências de óleo em superfície e subsuperfície.

Já os folhelhos Ponta Grossa apresentam potencial conhecido para gás e condensado, tendo-se comprovado (Zalán *et al.* 1990) seu avançado nível de maturação termal em grande parte da bacia, com exceção da porção leste.

Além destas duas unidades, também aparecem com potencial mais reduzido os folhelhos Vila Maria, que teriam condições de geração de hidrocarbonetos gasosos; no Paraguai foram constatados bons indícios de óleo e gás na unidade correlata, denominada Vargas Peña, onde o teor de carbono orgânico atingiu 2% (Milani *et al.* 1990).

No tocante ao fator reservatório, Milani *et al.* (1990) relatam que na chamada "Calha Central" da bacia, ocorrem diversos sistemas arenosos que poderiam receptar os fluidos expulsos das geradoras. Segundo estes autores, os arenitos das unidades Alto Garças, Furnas e Itararé apresentam características de permo-porosidade regulares, mas suficientes para a produção de gás e condensado.

Com base em estudos sedimentológicos e geofísicos, França e Potter (1991) analisaram o potencial dos reservatórios arenosos glaciogênicos do Grupo Itararé e caracterizam como bons reservatórios, aqueles localizados em profundidades superiores a

1 km, com porosidade secundária de 10 a 15% e resposta no perfil de raio-gama abaixo de 50 API. Em termos litoestratigráficos, estes pacotes estariam localizados nas porções basais das formações Campo Mourão e Taciba.

Os corpos de arenitos deltaicos da Formação Rio Bonito destacam-se por suas excelentes propriedades permo-porosas, chegando a atingir 20% de porosidade em profundidades por volta de 4000 m e boas condições de pressão e transmissibilidade (Milani *et al.* 1990).

Uma propriedade dos sistemas petrolíferos da Bacia do Paraná ainda pouco avaliada e que certamente determinou a eficácia e eficiência na retenção dos hidrocarbonetos, diz respeito às rochas selantes. A qualidade, a continuidade lateral e o grau de deformação dos selos são características que necessariamente devem ser avaliadas num sistema petrolífero.

Demaison e Huizinga (1991) propuseram uma classificação genética dos sistemas petrolíferos, em termos de potencial de alimentação, tipo de drenagem e grau de resistência (impedância) à dispersão dos fluidos. Na Figura 15 é apresentado um sistema petrolífero normalmente alimentado, drenado lateralmente e com baixa impedância. As bacias intracratônicas, como é o caso da Bacia do Paraná, seriam contextos favoráveis a apresentarem tais características; estes autores ressaltam que a falta de atividade tectônica após a migração e trapeamento dos hidrocarbonetos, seria um fator necessário à preservação da integridade dos selos. Além disso, tem a questão do fator preservação, o qual deve ser muito bem investigado em bacias como a do Paraná, pois a própria configuração de seus estratos permite uma carga muito grande de águas meteóricas em direção ao seu interior. Esta propriedade do sistema deveria ser considerada como um critério delimitador de áreas de interesse, uma vez que as acumulações potenciais estariam situadas fora da janela de biodegradação.

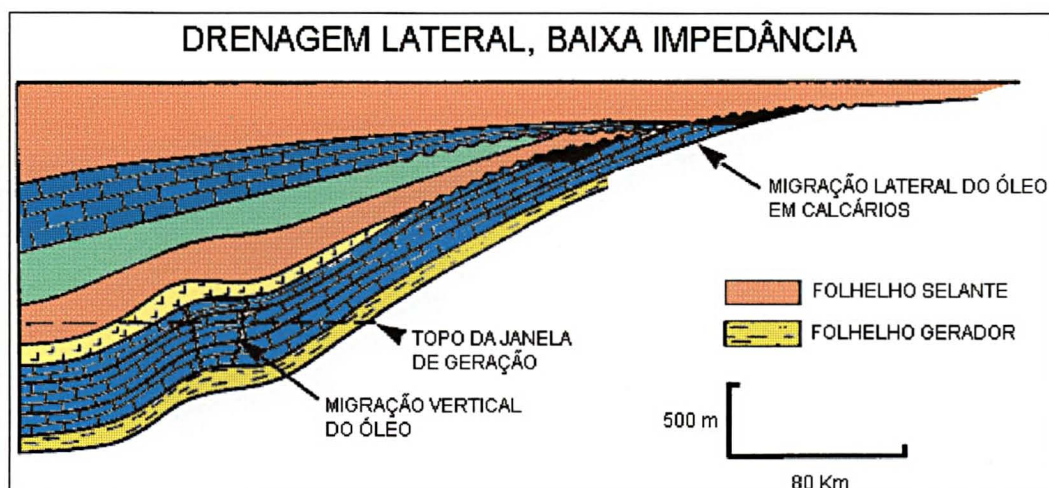


FIGURA 15 - Exemplo de um sistema petrolífero com baixa impedância, baseado em caso da Bacia de Williston (EUA; modificado de Demaison e Huizinga 1991).

No Sistema Petrolífero Ponta Grossa - Furnas os próprios folhelhos geradores poderiam atuar como selantes das estruturas. Neste caso, verifica-se uma condição ideal para a retenção dos fluidos, pois os folhelhos transgridem progressivamente por sobre os arenitos Furnas.

No Sistema Petrolífero Ponta Grossa - Itararé os diamictitos seriam os selos em potencial, no entanto, sua qualidade e continuidade lateral são discutíveis. França e Potter (1991) recomendam que os diamictitos sejam melhor rastreados e avaliados, principalmente aqueles que apresentam maior conteúdo de argila, já que estes seriam mais eficientes no confinamento dos reservatórios glaciogênicos.

O Sistema Petrolífero Irati - Rio Bonito/Tietê apresenta como camadas selantes os pelitos da Formação Palermo, os quais encontram-se recobrendo as rochas-reservatório em potencial, além dos próprios níveis argilosos da Formação Irati.

Já o Sistema Petrolífero Irati - Pirambóia, além de apresentar as rochas geradoras muito distantes dos reservatórios, obrigando uma longa migração vertical, peca pela falta de bons selantes. Neste caso, os únicos com certo potencial seriam os estratos vulcânicos da Formação Serra Geral.

Os sistemas petrolíferos Vila Maria - Alto Garças e Vila Maria - Furnas situam-se em profundidades da ordem de 4500 a 6000 m (Zalán *et al.* 1990), e até o momento suas propriedades são muito pouco conhecidas. Os depósitos pelíticos das unidades Vila Maria, Iapó e Ponta Grossa poderiam servir como selantes das possíveis estruturas trapeadoras.

Além das camadas selantes listadas acima, consideradas partes constituintes previsíveis dos sistemas em questão, podem ocorrer ainda corpos intrusivos concordantes, os quais distribuem-se ao longo de todo o registro da bacia.

Finalmente, a respeito da influência da atividade ígnea juro-cretácia no desenvolvimento dos sistemas petrolíferos da Bacia do Paraná, alguns autores (Zalán *et al.* 1990; Milani *et al.* 1990) acreditam que este evento elevou os níveis de maturação da matéria orgânica presente nas geradoras, devido ao calor envolvido no fenômeno e/ou à sobrecarga imposta por sobre toda a coluna de rochas sedimentares.

3 MÉTODOS E MEIOS

Neste capítulo serão apresentados os dados e as informações utilizados na pesquisa, bem como os principais aspectos referentes à base conceitual dos métodos empregados. Todo o planejamento de aquisição dos dados e escolha dos métodos foi direcionado com base nos objetivos previamente estabelecidos.

Para a identificação, discriminação e mapeamento das paleo-estruturas atuantes em períodos distintos da história evolutiva da Bacia do Paraná, foram desenvolvidos estudos de análise de tendência e análise geoestatística da variabilidade espacial de dados de espessuras e de dados gravimétricos possibilitando, com isso, a caracterização de morfoestruturas nos mapas gerados. Os recursos computacionais (*softwares*) utilizados nas diferentes etapas de estudo são listados na Tabela 01.

3.1 AQUISIÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados obtidos em todas as campanhas exploratórias realizadas até o momento na Bacia do Paraná, encontram-se no acervo técnico da PETROBRÁS. Neste trabalho utilizou-se uma base de dados limitada ao que já foi concedido aos projetos de pesquisa desenvolvidos pelo Departamento de Geologia da UFPR, além do material disponível em publicações técnicas.

Uma das primeiras etapas foi estabelecer a precisão e homogeneização cartográfica dos dados e informações utilizados, já que os mesmos foram extraídos de fontes diversas. Toda a base de dados e informações foi georreferenciada com base no sistema de projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator), uma vez que este sistema é bastante utilizado no Brasil e, além disso, as distâncias são corretamente representadas.

TABELA 01 - Relação dos programas computacionais utilizados na pesquisa.

<i>Software</i>	<i>Operação</i>
1. Microsoft Word 97	elaboração do texto
2. Microsoft Excel 97	discretização e composição de planilhas de dados
3. Grapher 1.0	elaboração de gráficos
4. Surfer 6.02	estimativa por krigagem, geração e associação de mapas
5. Statistica 4.3	análise estatística descritiva
6. Variowin 2.2	análise variográfica
7. Autocad 12.0	digitalização de elementos cartográficos
8. Selcaso	seleção aleatória de sub-conjunto de dados
9. Anafav	quantificação da favorabilidade
10. Maxicad	transformação afin
11. Rockworks (DOS)	ajustes das superfícies de tendência
12. Geosoft	transformação para coordenadas UTM
13. Geo-Eas 1.2.1	estimativa dos erros de krigagem

1 Copyright © 1983-1997 Microsoft Corporation.

2 Copyright © 1985-1997 Microsoft Corporation.

3 Copyright © 1992 Golden Software, Inc.

4 Copyright © 1993-96 Golden Software, Inc.

5 Copyright © 1993 StatSoft, Inc.

6 Copyright © 1993-95 Yvan Pannatier.

7 Copyright © 1993 Autodesk, Inc.

8 Programado em Turbo Basic por Paulo César Soares (inédito, UFPR, 1996).

9 Programado em Turbo Basic por Paulo César Soares (inédito, UFPR, 1996-98).

10 Copyright © 1996 Maxidata

11 Copyright © 1983-1991 Rockware, Inc.

12 Copyright © 1996 Geosoft, Inc.

13 Environmental monitoring systems laboratory, US-EPA, Open File, 1988.

O procedimento envolveu a transformação da posição espacial de cada valor para coordenadas UTM (utilizado esferóide de Hayford 1910) em relação ao meridiano 51° W.GR., utilizando-se uma função do GEOSOFT. Alguns mapas disponíveis na literatura e em relatórios técnicos foram digitalizados em ambiente AUTOCAD e também georreferenciados no sistema UTM.

Sabendo-se que os mapas utilizados estavam sujeitos à algum tipo de distorção espacial, tornou-se necessário aplicar uma correção geométrica aos mesmos. Utilizou-se para isso, a transformação baseada em pontos de controle no terreno, denominada transformação

afim, cuja precisão é muito boa; esta operação foi feita no MAXICAD. Em cada mapa foram identificados dez pontos de controle, no caso as posições de dez poços para petróleo distribuídos por toda a área e com as reais coordenadas conhecidas. Passadas estas informações, o programa efetuou o cálculo das transformações e atribuiu a cada ponto do mapa suas verdadeiras coordenadas. A seguir estão listados os tipos de dados e informações utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

PERFIS DE POÇOS PARA PETRÓLEO

Foram analisados, aproximadamente, 60% do total de perfis de poços perfurados na Bacia do Paraná. O trabalho foi direcionado, principalmente, na reavaliação dos contatos entre algumas unidades litoestratigráficas e na caracterização destas unidades quanto à presença, quantidade, tipo de ocorrência de hidrocarbonetos (óleo/gás) e resultados obtidos nos testes de formação.

LISTAGEM DE TOPO E BASE DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

A listagem traz informações para 110 poços, contendo as profundidades e cotas de topo e base das unidades litoestratigráficas atravessadas. Essa fonte de dados foi de grande importância para a construção dos bancos de dados de espessuras e delimitação das áreas protegidas dos sistemas petrolíferos.

DADOS GRAVIMÉTRICOS

Os dados gravimétricos foram obtidos via Internet através de conexão com o *site* <http://www.ngdc.noaa.gov>. Este banco de dados caracteriza-se por apresentar distribuição regular, em formato *grid*, com espaçamento médio de 9 km entre os valores. Foram utilizados

19.677 dados de anomalia Bouguer abrangendo toda a Bacia do Paraná e adjacências, buscando-se identificar descontinuidades com significado geológico.

MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS

Foi utilizado um mapa contendo os principais lineamentos estruturais da porção central da Bacia do Paraná, elaborado por Soares *et al.* (1982), com base na análise e interpretação morfoestrutural sobre imagens de satélite e radar, nas escalas 1:500.000 e 1:250.000. O mapa apresentado neste trabalho (p. 188) foi digitalizado em AUTOCAD e georreferenciado no MAXICAD. Esta base de informações foi utilizada com o propósito de analisar o grau de correlação espacial entre as acumulações de óleo/gás e as estruturas lineares pós-basalto, já que os lineamentos identificados a partir da análise das espessuras, refletem somente períodos mais antigos de atividade tectônica.

MAPAS DE ISOMATURIDADE DE ROCHAS GERADORAS

Os únicos mapas de isomaturidade publicados foram encontrados no trabalho de Goulart e Jardim (1982), os quais trouxeram algumas informações sobre geoquímica orgânica das principais unidades rochosas potencialmente geradoras na bacia, no caso, as formações Ponta Grossa e Irati. O propósito da utilização destes mapas foi delimitar regiões na bacia com maior potencial de maturação da matéria orgânica, nas duas unidades supracitadas.

LOCALIZAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS DE ÓLEO E GÁS

Todos os perfis disponíveis de poços para petróleo foram analisados em termos de ocorrências de óleo e gás. Ao longo de cada perfil foram feitas as seguintes anotações :

- a) presença ou não de algum indício; b) profundidades e unidades portadoras de indícios;

c) resultados dos testes de formação e; d) características do intervalo produtor, se presente. Com base nestas anotações, foi possível discriminar quatro classes de poços : i) sem indícios; ii) com indícios, mas sem recuperação nos testes de formação; iii) com recuperação nos testes de formação e; iv) produtor (sub-comercial e comercial). Este procedimento foi considerado de grande valia durante a quantificação de favorabilidade nos sistemas petrolíferos.

MAPA DOS CONTORNOS LIMÍTROFES DA BACIA DO PARANÁ

Todos os mapas apresentados neste trabalho têm como base o mapa limítrofe da bacia, contendo : a) os limites aflorantes do embasamento; b) os limites interestaduais e internacionais e; c) a localização das capitais. O mapa original foi compilado e digitalizado em AUTOCAD, e georreferenciado no MAXICAD por Soares *et al.* (1995), sendo realizadas algumas adaptações para este trabalho.

3.2 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

A análise de tendência (*trend surface analysis*) consiste numa regressão polinomial amplamente empregada em ciências naturais. Em geologia, é comumente utilizada para reconhecer tendências ou comportamentos sistemáticos regionais de dados distribuídos espacialmente. O método consiste em ajustar aos dados, uma superfície definida por uma equação.

A superfície de tendência pode ser planar (linear) ou geometricamente curva (quadrática, cúbica), tornando-se cada vez mais complexa a medida que o número de termos da equação que a define aumenta. É recomendável iniciar qualquer trabalho de análise de tendência ajustando-se uma superfície de primeira ordem e sucessivamente, as de mais altas

ordens, observando se ocorre um salto significativo no ajuste (R^2) em relação à superfície ajustada anteriormente.

A definição do modelo a ser utilizado depende dos objetivos previamente estabelecidos na pesquisa, ou seja, se a intenção é explicar um fenômeno geológico complexo ou apenas definir as tendências gerais dos dados analisados. É importante ressaltar que a superfície de tendência não é necessariamente, um bom estimador da distribuição da variável analisada, uma vez que seu principal propósito é testar hipóteses estatísticas (Swan e Sandilands 1995), como por exemplo : a espessura de uma unidade litoestratigráfica está aumentando de norte para o sul da bacia ?

Com o ajuste de uma superfície de tendência, uma medida importante é obtida entre a diferença dos valores calculados e os valores observados; trata-se do resíduo. Se por exemplo, um conjunto de dados de espessura de uma unidade litoestratigráfica, for ajustado à uma superfície de 2ª ordem e esta apresentar $R^2 = 0,8$, isto significa que 20% corresponderia aos desvios entre a superfície estimada e os valores originais. Neste exemplo, nota-se que a maior parte do fenômeno é explicada por uma superfície parabólica simples, que poderia ser interpretada como a tendência geral de acumulação da unidade para o interior da bacia. Os desvios não explicados pela superfície podem representar variações locais como, por exemplo, falhas sin ou pós-sedimentares, ou ainda paleo-relevos.

3.3 ANÁLISE VARIOGRÁFICA

Diversas obras na literatura discutem de maneira didática e aprofundada, os fundamentos das técnicas geoestatísticas, como a análise variográfica e a krigagem; entre elas, destacam-se os trabalhos de Isaaks e Srivastava (1989), Andriotti (1988), Landim (1985), Valente (1982), Clark (1979, 1980) e Journel e Huijbregts (1978).

A geoestatística surgiu com a evolução da chamada Teoria das Variáveis Regionalizadas, e ambas tiveram um grande desenvolvimento graças aos estudos realizados pelo francês Georges Matheron, a partir do final da década de 50. A geoestatística trata as variáveis como regionalizadas, assumindo que seus valores apresentam um certo grau de autocorrelação espacial até uma determinada distância.

Nas ciências da Terra é comum se deparar com fenômenos caracterizados pela dependência espacial entre as amostras. Tais fenômenos não podem ser tratados e nem explicados pela estatística clássica, a qual desconsidera a distribuição e a autocorrelação espacial entre as amostras. Em geologia, são exemplos de variáveis regionalizadas (V.Rs.) o teor de um elemento, a espessura de uma camada, a altura piezométrica de um aquífero, dados gravimétricos, entre outros.

As relações de continuidade espacial entre as amostras podem ser analisadas quantitativamente, com a utilização do chamado semivariograma. O procedimento de construção dos semivariogramas e seus ajustes aos modelos teóricos é denominado análise variográfica ou estrutural. A medida básica desta técnica geoestatística é a variância, que expressa o grau de interdependência espacial entre os dados ao longo de uma determinada direção.

Essas relações são demonstradas matematicamente pela expressão que define o semivariograma :

$$\gamma(h) = \frac{\sum [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2}{2N} ,$$

onde : $\gamma(h)$: valor-semivariograma para uma distância h

$[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$: quadrado da diferença entre dois valores, distanciados em h

N : número total de pares combinados para uma distância h

O semivariograma teórico é definido como a variância das diferenças entre dados separados por uma distância h ; teórico quando se admite, por exemplo, que ele cobrirá todo um depósito mineral. Na prática, porém, apenas um número limitado de amostras será considerado e portanto, um semivariograma experimental será obtido (Clark 1980).

Considerando-se um espaçamento h entre dois dados $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$, os valores semivariograma podem ser estimados para distâncias múltiplas de h (Figura 16), e os resultados apresentados sob a forma de um gráfico $\gamma(h) \times h$ (Figura 17).

Observa-se no exemplo da Figura 17, que quando a distância h entre os pontos amostrados é zero, a diferença quadrática entre valores z separados por h é maior que zero, o que demonstra a presença de uma componente de variação não estruturada ou aleatória em $h = 0$; esta componente é denominada efeito-pepita (*nugget effect*), a qual pode indicar erros na amostragem ou ainda representar o patamar de uma componente estruturada de pequena escala, cujo alcance é muito menor que o intervalo amostrado. Para pequenos valores de h (os primeiros passos), os pontos comparados tendem a ser muito similares entre si e portanto, a variância é pequena. Com o aumento da distância h entre os pontos amostrados, a interdependência espacial diminui, resultando em altos valores de $\gamma(h)$. À uma determinada distância, a variância para de crescer e o valor de h correspondente é denominado alcance (*range*). As amostras que se encontram numa distância além do alcance são consideradas espacialmente independentes, pois estão tão distantes uma da outra, que não há mais relação entre elas e assim, suas diferenças quadráticas passam a apresentar mesma variância. A partir desta distância, observa-se que o semivariograma atinge um patamar (*sill*), representando um valor médio em torno do qual os valores semivariograma se dispõem.

É comum aparecerem na estrutura dos semivariogramas, algumas feições indicativas de fenômenos particulares. Uma delas é o chamado efeito-de-buraco (*hole effect*), o qual indica a

presença de uma componente periódica nos fenômenos, como por exemplo, repetidas intercalações entre faixas com maior e menor espessura. Outra feição interessante é a imbricação nos semivariogramas, ou seja, a presença de estruturas superpostas com diferentes regionalizações ou ordens de grandeza. Tais feições serão observadas no decorrer do trabalho.

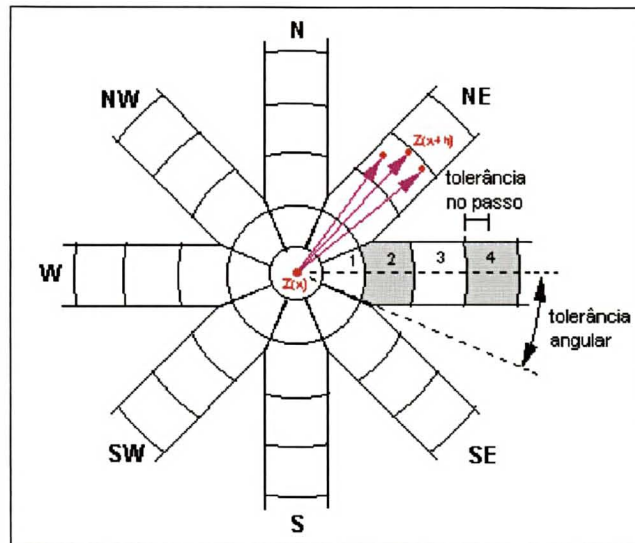


FIGURA 16 - Diagrama ilustrando a prática de agrupamento de um conjunto de pares numa determinada classe, a fim de gerar valores-semivariograma mais robustos (modificado de Sharov 1995). Obs: 1, 2, 3 e 4 correspondem aos passos.

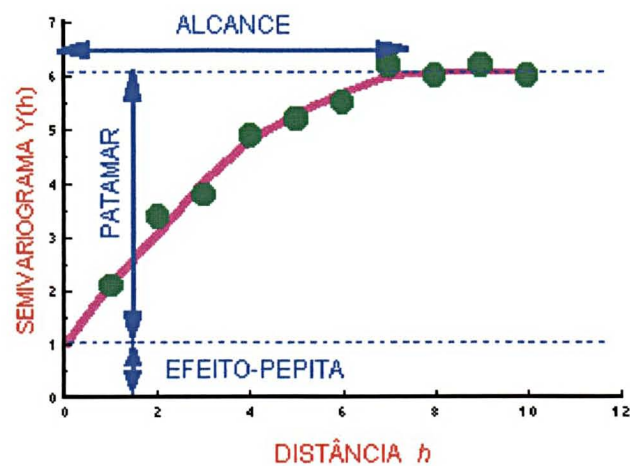


FIGURA 17 - Componentes básicos de um semivariograma (modificado de Sharov 1995).

Porém, antes de se prosseguir com uma análise variográfica, deve-se verificar se o conjunto de realizações de $Z(x)$ provém de uma função aleatória estacionária. Ao menos uma das chamadas hipóteses restritivas, que são a estacionaridade estrita, a estacionaridade de 2ª ordem e a quasi-estacionaridade, deve ser respeitada em uma análise estrutural. A variável é dita estacionária se não houver nenhum efeito-deriva (*drift*) ou tendência significativa dentro da área analisada. Os resíduos obtidos com a análise de tendência podem alcançar a condição de estacionaridade.

A validade da hipótese de estacionaridade de 2ª ordem ou a da quasi-estacionaridade pode ser detectada através da construção dos primeiros semivariogramas experimentais. Confirmando-se a validade de uma delas, os estudos geoestatísticos podem ser prosseguidos. Na prática, o semi-variograma só é usado para distâncias limitadas ao diâmetro da vizinhança de estimação, a qual corresponde à zona que contém a informação a ser utilizada (Valente 1982). Nestes casos, a função estrutural é apenas localmente estacionária, havendo um compromisso entre a escala da homogeneidade do fenômeno em estudo e a quantidade de informação disponível; trata-se da chamada hipótese da quasi-estacionaridade.

Em geral, numa análise variográfica são construídos no mínimo, quatro semivariogramas direcionais com orientações N/S, E/W, NE/SW e NW/SE. A intenção é verificar se a distribuição espacial das amostras reflete ou não um ambiente isótropo. Se os semivariogramas direcionais apresentarem parâmetros muito semelhantes, tudo indica que o fenômeno analisado é isótropo. No entanto, muitos fenômenos observados nas ciências da Terra mostram uma direção preferencial de continuidade espacial, refletindo ambientes anisótropos (Figura 18).

Considerando que o semivariograma depende da direção em que é calculado, é fácil compreender o surgimento de andamentos diferentes conforme a direção analisada (Valente

1982). Com isso, uma característica que comumente é observada nas estruturas dos semivariogramas é a presença das chamadas anisotropias geométrica e zonal. Na anisotropia geométrica típica (Figura 18), semivariogramas de diferentes direções apresentam diferentes alcances, sendo que os outros parâmetros mantêm-se iguais. Na anisotropia zonal típica, diferentes semivariogramas mostram diferentes patamares e mesmos alcances. No entanto, o mais comum é que estes dois tipos de anisotropia ocorram em conjunto num mesmo fenômeno anisótropo, ou seja, os semivariogramas mostrando diferentes patamares e diferentes alcances.

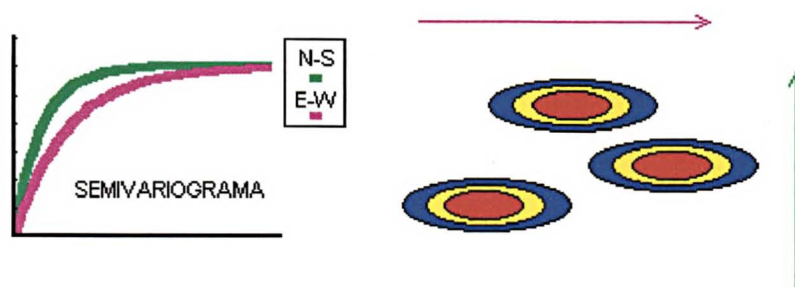


FIGURA 18 - Semivariogramas direcionais obtidos a partir da análise de um fenômeno anisotrópico. Maior continuidade espacial ocorre na direção E/W (modificado de Sharov 1995).

Outra etapa importante da análise variográfica refere-se à definição dos limites de tolerância linear e angular, os quais são ilustrados esquematicamente na Figura 16. A tolerância no passo (linear) corresponde à distância em torno do valor do passo, dentro da qual serão feitos os cálculos de um valor-semivariograma. Por exemplo, um passo de 50 ± 25 m indica que amostras distanciadas entre si de 25 a 75 m serão consideradas nos cálculos daquele passo. Já a tolerância angular corresponde à metade da abertura angular em torno do eixo da direção pesquisada (ver Figura 16). Por exemplo, uma tolerância de 30° indica que a combinação entre

uma amostra com as demais dar-se-á dentro de um cone com 60° de abertura. Tais parâmetros costumam ser definidos após várias tentativas e erros, até se atingir o propósito desejado.

A partir da definição de todos esses parâmetros básicos, o passo seguinte é selecionar os semivariogramas correspondentes às direções de maior e menor continuidade espacial. Em seguida devem ser construídos novos semivariogramas em torno das prováveis direções de anisotropia, a fim de se definir com maior segurança e precisão as direções que condicionaram a gênese do fenômeno analisado.

Finalmente definidas as direções controladoras do fenômeno, a última etapa de uma análise estrutural corresponde ao ajuste de modelos variográficos teóricos aos semivariogramas experimentais. Os principais modelos teóricos são o esférico (Figura 17), o gaussiano (Figura 19), o exponencial, o potencial e o logarítmico, sendo que os três primeiros apresentam patamar e os dois últimos mostram estruturas que crescem indefinidamente. No presente trabalho, o modelo de Gauss ou gaussiano foi o que se ajustou a quase totalidade dos semivariogramas. Trata-se de um modelo do tipo transição e caracteriza-se pelo comportamento parabólico nas proximidades da origem, refletindo fenômenos extremamente contínuos (Figura 19).

A presença de efeito-pepita no modelo de Gauss é atribuída por alguns autores (Andriotti 1988, Valente 1982) à existência de erros humanos de amostragem. Porém, no caso específico dos dados de espessura, constatou-se neste trabalho que a existência desta descontinuidade na origem do semivariograma possa ser causada por micro-regionalizações, com alcance menor que o intervalo amostrado, ou ainda devido à presença de falhas geológicas passando por entre amostras muito próximas entre si.

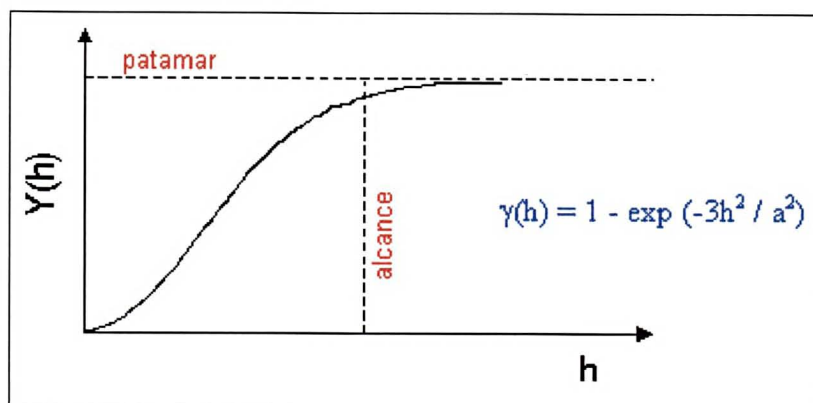


FIGURA 19 - Modelo variográfico teórico de Gauss e a equação que o define.

A fim de proporcionar melhor compreensão do poder da ferramenta geoestatística, foi construído um banco de dados hipotético, contendo 36 valores referentes à cota do topo do embasamento de uma bacia sedimentar, e em seguida analisou-se a continuidade espacial das amostras por intermédio do semivariograma. A distribuição espacial dos dados é ilustrada na Figura 20. Propositamente, os valores foram dispostos segundo um *trend* nordeste facilitando, deste modo, o raciocínio de correlação entre os semivariogramas direcionais gerados e a variabilidade espacial dos dados.

Nota-se na Figura 20 a presença de três sub-populações estatísticas distintas, com limites abruptos entre si; em termos geológicos, partiu-se da premissa que elas representariam um *horst* central limitado por dois *grabens* laterais. Na análise de tendência foram obtidos os seguintes ajustes, das superfícies de 1ª a 4ª ordem : 1ª - 11,4% ; 2ª - 66,2% ; 3ª - 82,8% ; 4ª - 85,5%. Observa-se que o maior salto no ajuste se deu entre as superfícies de 1ª e 2ª ordem e que a superfície de 4ª ordem já não apresenta significado estatístico em relação à superfície precedente. Na Figura 21 são apresentados os quatro mapas de tendência obtidos nesta análise simulada.

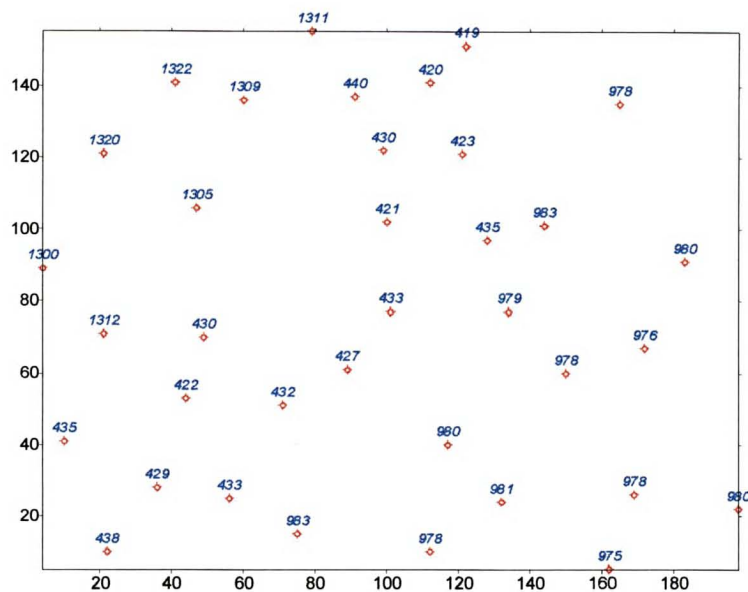


FIGURA 20 - Localização e valor das cotas dos dados referentes ao caso simulado.

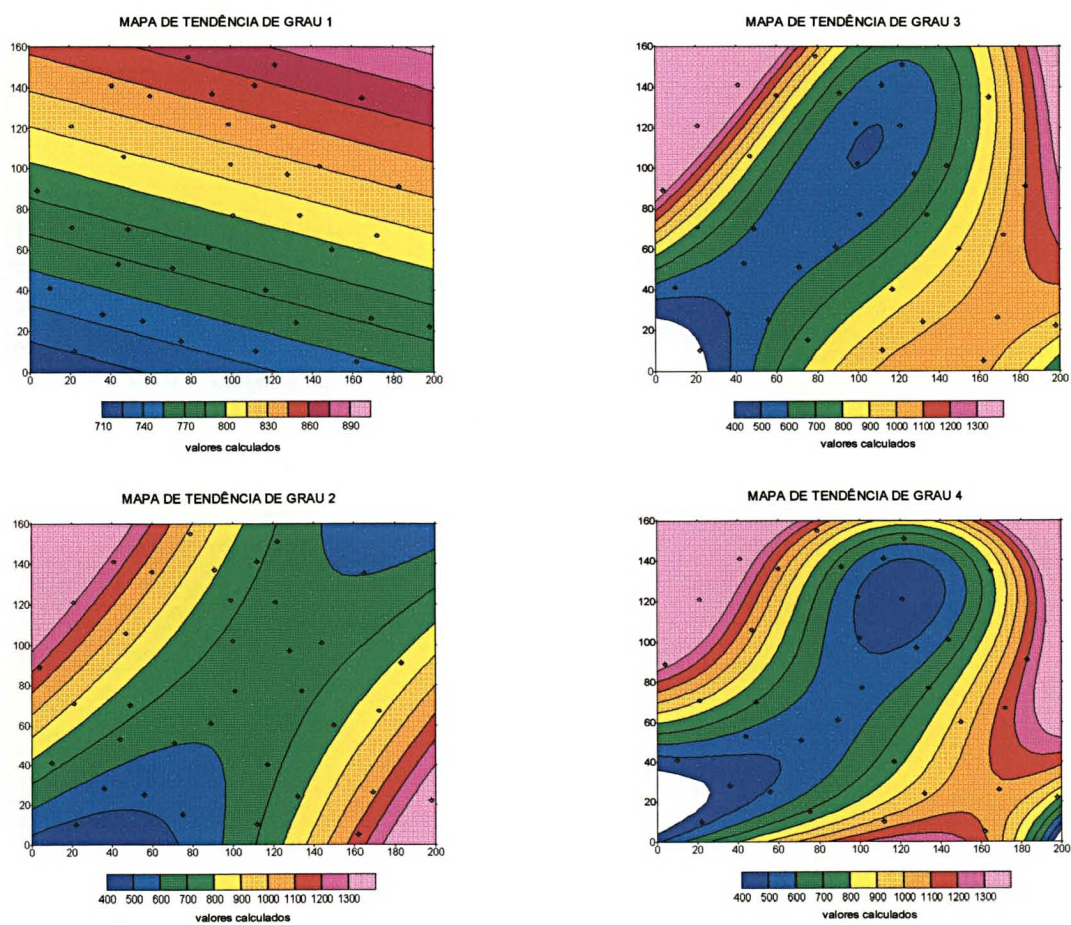


FIGURA 21 - Mapas de tendência da distribuição dos valores hipotéticos.

A análise de tendência sugere que o mapa de 2ª ordem representa, a grosso modo, a distribuição regional da variável e portanto, os resíduos de grau 2 poderiam ser analisados geoestatisticamente, caso o objetivo fosse mapear estruturas de interesse local. No entanto, para esta análise simulada optou-se em trabalhar com os dados brutos, a fim de facilitar o entendimento dos resultados proporcionados pelo método.

A análise variográfica dos dados brutos revelou, com base na superfície-variograma (Figura 22) e nos semivariogramas direcionais da Figura 23, que o fenômeno em questão é certamente anisótropo. A direção de maior continuidade ou menor variabilidade espacial encontra-se em torno da direção N45E, o que já se sabia a princípio. É ao longo desta direção em que as amostras combinadas são mais semelhantes entre si (ver Figura 20) e, portanto, como consequência, o semivariograma reflete em sua estrutura o mais baixo patamar, o maior alcance e também o menor efeito-pepita, em relação às demais direções analisadas. Nota-se que neste exemplo, as anisotropias zonal e geométrica ocorrem em conjunto.

Um fato interessante não previsto inicialmente, foi a presença de uma estrutura imbricada no semivariograma da direção N45E. Tal feição indica a superposição de dois fenômenos com diferentes magnitudes. O menor deles reflete a presença de estruturas geológicas de pequeno porte ou "secundárias", posicionadas ao longo da direção perpendicular (N45W); observa-se no semivariograma o efeito-de-buraco à uma distância média de 75 km, indicando uma maior similaridade entre as amostras combinadas à esta distância, ao longo da direção N45E. Já a estrutura maior indica a própria continuidade espacial das amostras, em termos mais regionais (estruturas "primárias"), ao longo da direção N45E.

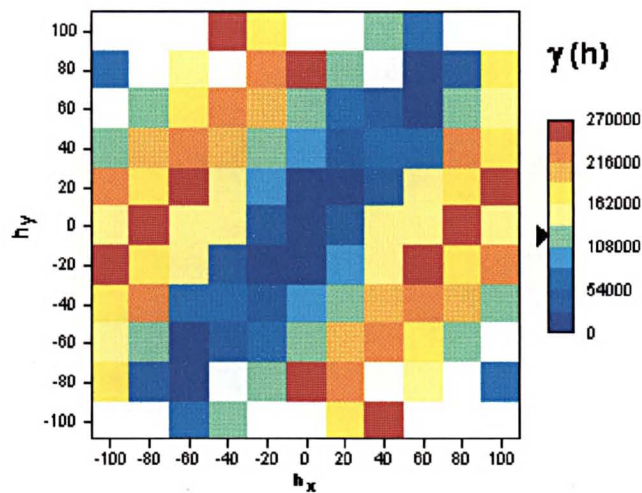


FIGURA 22 - Na superfície-variograma cada *pixel* representa uma medida de continuidade espacial e os valores em x e y indicam a distância média de combinação entre as amostras. Notar a forte estruturação nordeste.

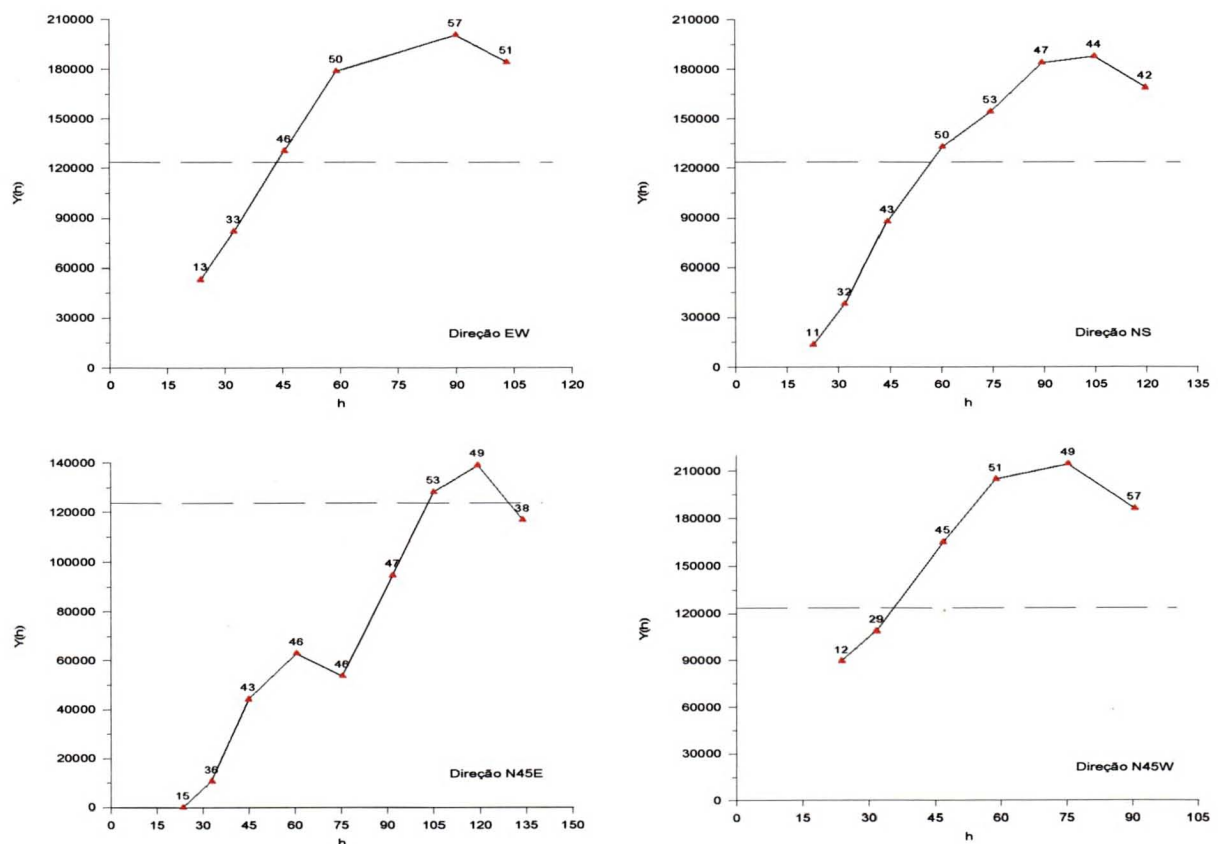
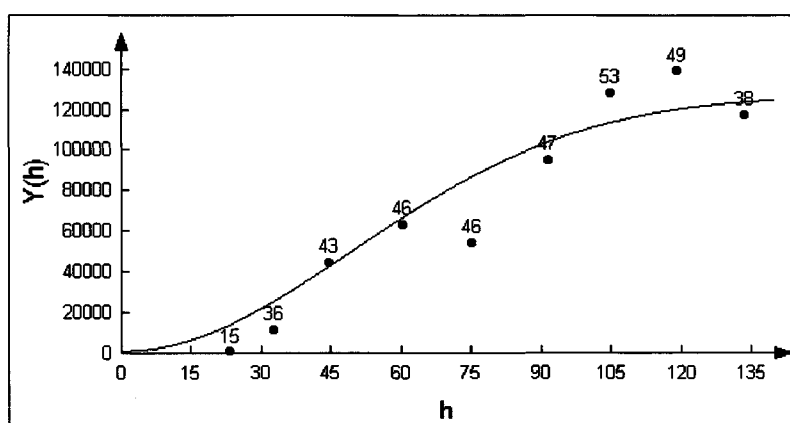


FIGURA 23 - Semivariogramas direcionais refletindo a anisotropia do fenômeno.

Finalmente, os semivariogramas das direções N45E e N45W, respectivamente as direções de maior e menor continuidade espacial, foram ajustados a um modelo teórico (Figura 24). Aquele que melhor se ajustou foi o do tipo gaussiano, mesmo com a dificuldade encontrada ao se modelar o semivariograma nordeste, devido à presença de estrutura imbricada. Os parâmetros variográficos obtidos com a modelagem são apresentados no capítulo seguinte, no qual foi feita a krigagem.

(A)



(B)

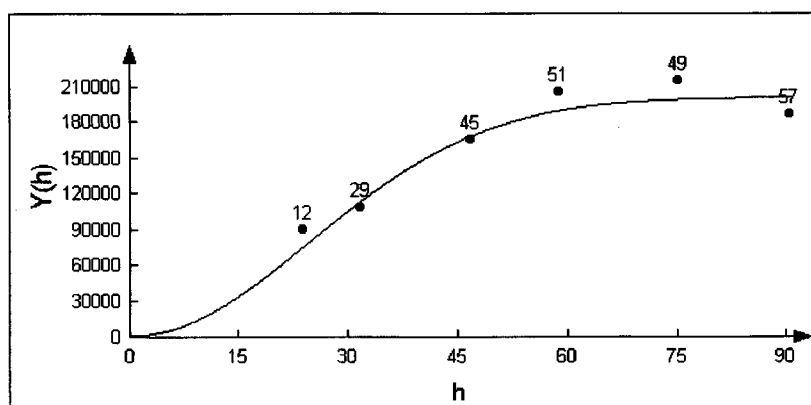


FIGURA 24 - Modelagem dos semivariogramas das direções de anisotropia N45E (A) e N45W(B). Cada valor-semivariograma contém o número de pares utilizados para seu cálculo.

A análise variográfica representa a etapa mais crítica em um estudo geoestatístico, pois é a partir da definição dos parâmetros do semivariograma que as estimativas por krigagem serão realizadas. Os cuidados devem ser redobrados, caso as amostras disponíveis para os cálculos forem em pequeno número : a definição equivocada de uma direção considerada de maior continuidade espacial, irá certamente influenciar de maneira muito acentuada os resultados obtidos por krigagem.

3.4 KRIGAGEM

A krigagem consiste num método geoestatístico de estimativa de valores desconhecidos, a partir da utilização de todas as amostras disponíveis em uma área, sendo que esta informação é devidamente ponderada de forma a minimizar a variância do erro de estimação. O estimador de krigagem é conhecido como sendo do tipo BLUE (*best linear unbiased estimator*).

A estimativa por krigagem considera em seus cálculos de ponderação : a) o número de amostras utilizadas; b) as posições das amostras na área a ser avaliada; c) as distâncias entre as amostras e a zona a ser estimada e; d) a continuidade espacial da variável em estudo (Andriotti 1988).

O erro de krigagem, que corresponde ao desvio em torno do valor estimado, é uma das principais informações que diferencia a krigagem dos demais métodos. A krigagem foi escolhida como método para interpolação neste trabalho, principalmente por levar em consideração a continuidade espacial das amostras, proporcionando deste modo, a obtenção de mapas com feições geológicas mais realistas possível.

Atualmente existem diferentes métodos de krigagem, e a escolha de um em particular dependerá das exigências do estudo a ser desenvolvido e de alguns fatores como, por exemplo,

o número de informações disponíveis e a presença ou não de deriva. Entre os principais tipos, podem ser citadas as krigagens simples, ordinária, universal, com tendência externa e indicatriz. A krigagem ordinária é um dos métodos de estimação mais utilizados nos estudos geoestatísticos, sendo que neste trabalho foi empregada com a utilização do SURFER.

A krigagem universal não foi utilizada, pois achou-se mais sensato retirar o efeito-deriva com a análise de tendência ficando, deste modo, ressaltadas as variações locais estimadas pela krigagem. Além disso, com este procedimento, que é recomendado por Isaaks e Srivastava (1989), o comportamento regional do fenômeno analisado fica melhor compreendido.

Voltando ao caso simulado apresentado no capítulo anterior, com a modelagem dos semivariogramas experimentais foram obtidos os parâmetros variográficos (Tabela 02), os quais foram posteriormente utilizados nos cálculos de cada valor estimado por krigagem.

Observa-se na Tabela 02 que foi necessário corrigir o fenômeno de anisotropia zonal, através da modelagem de duas componentes estruturais. Nota-se que para a segunda componente estrutural foi atribuído um valor muito alto no alcance do semivariograma NE, para que a curva do modelo se ajustasse aos valores-semivariograma. Tal procedimento é comumente adotado nos estudos geoestatísticos e apesar da utilização de um valor anômalo de alcance na modelagem da segunda componente, este artifício não provoca qualquer "estiramento artificial" nas linhas de contornos dos mapas gerados.

Nesta mesma tabela aparecem os termos "razão de anisotropia" e "elipse de pesquisa"; o primeiro é obtido a partir da relação entre o maior e o menor valor de alcance e normalmente, é solicitado nos *softwares* de geoestatística. A elipse de pesquisa ou de busca define quais valores vizinhos serão considerados na interpolação de cada cela; os dados localizados além das dimensões da elipse não são considerados na interpolação da cela. De

preferência, os raios da elipse de busca devem ser menores que os alcances mas se possível, nunca maiores, pois neste caso haveria a combinação de valores sem autocorrelação espacial. O maior eixo da elipse é direcionado ao longo da direção de maior continuidade espacial, e em algumas situações onde a quantidade de dados é muito pequena, costuma-se atribuir às suas dimensões valores pouco maiores que os alcances, para permitir a estimativa de um número maior de valores.

TABELA 02 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais do caso simulado.

Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
N45E e N45W	1 ^a	gauss.	1.300	126.600	122 60	2,03	Tipo : Quadrante Dados por setor : 5 Mínimo total : 3
	2 ^a	gauss.		73.400	1.000.000 60	16.667	Máx. setores vazios : 1 R ₁ : 122 km/R ₂ : 60 km

Dir.: direção analisada; Cp.: componente; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance; R.A.: razão de anisotropia

Nestas situações, alguns cuidados devem ser tomados para que os raios não apresentem distâncias além dos valores situados no patamar, ou ainda não abrangerem estruturas do tipo efeito-de-buraco. Em qualquer uma das situações, sempre devem ser mantidas as proporções dos alcances obtidos nas modelagens. A elipse pode conter um, quatro ou até oito setores, dentro dos quais são especificados o número máximo e mínimo de dados a serem utilizados nos cálculos de cada cela. No caso simulado optou-se em utilizar uma elipse composta por quatro setores.

Após a introdução dos parâmetros variográficos, o SURFER efetuou as estimativas de valores com a aplicação de um sistema de krigagem ordinária pontual; adotou-se um espaçamento de 20 km entre cada valor estimado. O mapa de valores krigados obtido é apresentado na Figura 25; o mapa de distribuição dos erros de estimativa, os quais foram calculados no GEO-EAS, é dado na Figura 26.

Observa-se na Figura 25 a marcante delimitação de uma zona central por duas faixas alinhadas na direção nordeste, marcadas pela abrupta mudança de gradiente; tal feição sugere um controle estrutural dado por falhas, resultando no aparecimento de um *horst* central delimitado por dois *grabens*. Notar uma certa similaridade deste mapa com o de tendência de 3ª ordem apresentado na Figura 21, o qual caracterizou-se pelo alto grau de explicabilidade desta superfície (83%). No mapa de distribuição dos erros, na Figura 26, verifica-se que os maiores erros de estimativa estão associados às porções não cobertas por informações e também às zonas de borda, posicionadas além dos dados limítrofes da área em questão.

Acredita-se que com a apresentação deste caso simulado, o potencial das técnicas geoestatísticas tenha sido destacado, além de ter oferecido uma base conceitual necessária para a compreensão dos resultados obtidos na pesquisa.

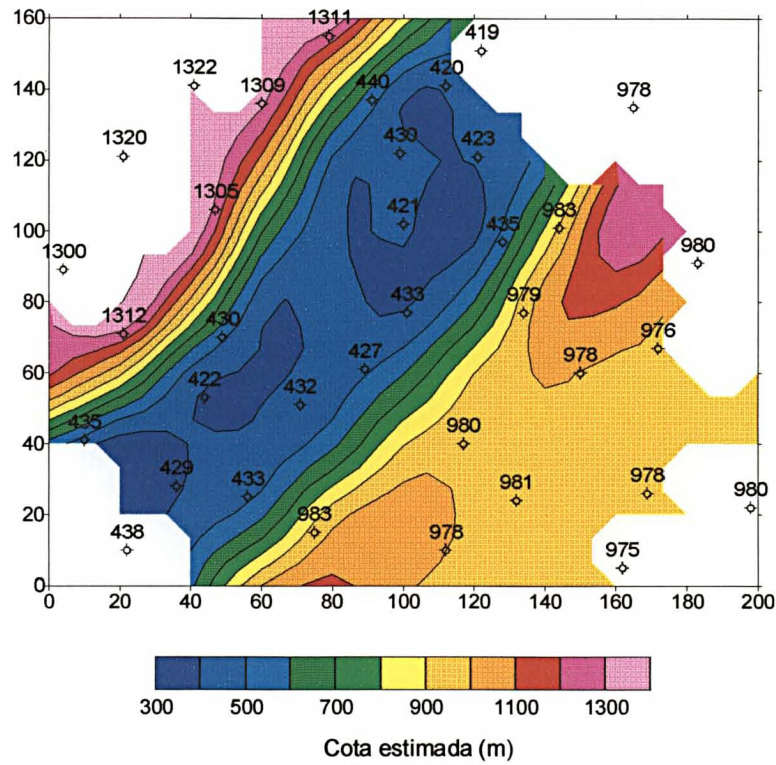
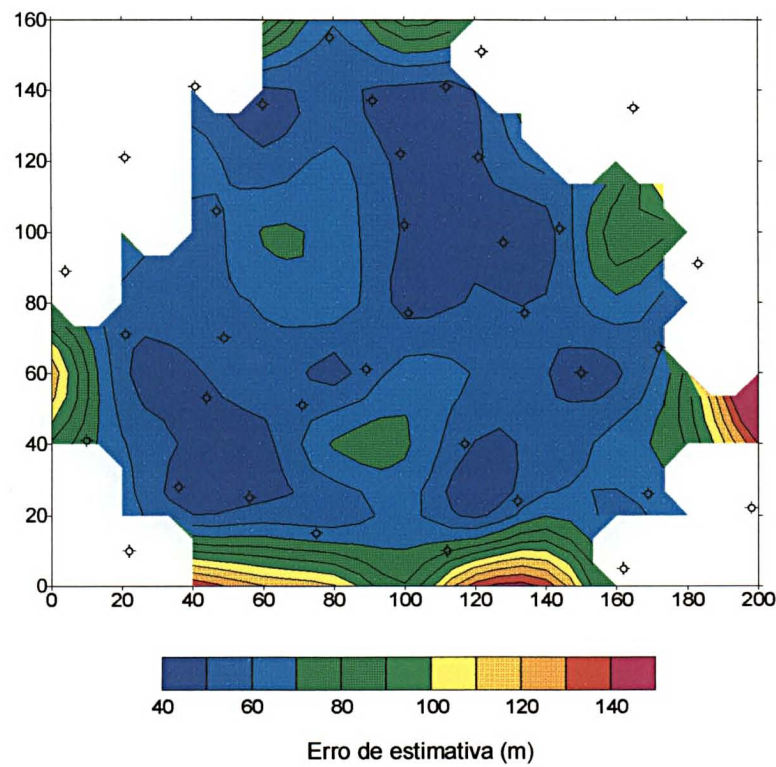


FIGURA 25 - Mapa dos valores de cota do embasamento estimados pelo método da krigagem.



3.5 ANÁLISE MORFOESTRUTURAL

A técnica de análise morfoestrutural consiste em observar o comportamento geométrico dos corpos sob investigação (p.e. espessuras, cotas, relevo gravimétrico), e com base na distribuição e arranjo espacial das linhas de isovalores, caracterizar feições estruturais sobre a superfície mapeada.

No mapa da Figura 25 apresentado anteriormente, é possível delinear através do arranjo proporcionado pelas curvas, duas grandes feições morfoestruturais alinhadas na direção nordeste, originadas como resposta aos elevados gradientes na variabilidade das cotas. Neste caso simulado, as duas feições morfoestruturais apresentam significado geológico bem definido, ou seja, duas grandes falhas delimitando três blocos.

Da mesma forma, após a confecção de todos os mapas de contorno obtidos no presente trabalho, feições morfoestruturais alinhadas (correspondentes à paleoformas) puderam ser traçadas através de análise visual, com base no arranjo geométrico das curvas de isovalores.

Neste trabalho foram investigados quatro arranjos morfoestruturais básicos (Figura 27), os quais correspondem às respostas a um determinado tipo de esforço a que foi submetida uma superfície. A esses arranjos foram atribuídas denominações e associados os possíveis significados geológicos :

1. *alinhamento de valores negativos de resíduos* : altos estruturais contemporâneos à sedimentação ou erosão do pacote;
2. *alinhamento de valores positivos de resíduos* : baixos estruturais contemporâneos à sedimentação ou modificação do pacote;
3. *alinhamento com abrupta mudança de gradiente* : descontinuidades associadas à movimentação vertical de blocos;

4. *alinhamento oblíquo de variação na direção* : descontinuidades associadas à movimentação vertical e/ou lateral de blocos.

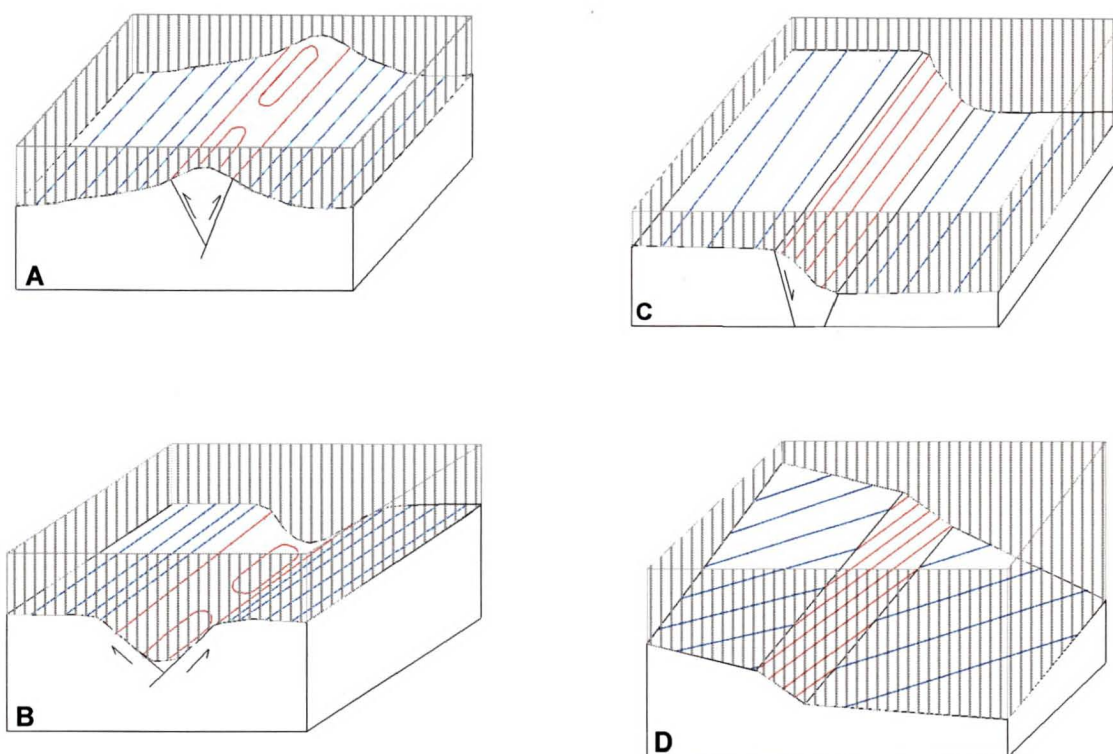


FIGURA 27 - Modelos geológicos previstos na análise dos mapas de contorno. As linhas em azul são isovalores, as zonas em vermelho representam faixas estruturais e as cercas em cinza, ilustram a variação tridimensional da variável, como por exemplo, espessura.

Observa-se que na Figura 27-A o modelo representa uma feição alinhada de altos estruturais, síncronos ou posteriores à sedimentação, onde ficariam registradas as menores espessuras (resíduos negativos). Já a Figura 27-B caracteriza-se pelo alinhamento de baixos estruturais, onde a acumulação ou preservação de sedimentos seria maior, e materializada

pelos resíduos positivos. Na Figura 27-C o modelo representa uma situação de descontinuidade longitudinal à variação de espessura, registrada pela justaposição lateral de dois blocos com valores de espessura distintos. Finalmente, a Figura 27-D revela uma situação de justaposição lateral de blocos, porém a feição estrutural linear encontra-se em posição oblíqua à maior variação de espessura.

As feições morfoestruturais pós-basalto foram analisadas por Soares *et al.* (1982) a partir de imagens radar e Landsat, e as principais estruturas de superfície identificadas foram aqui utilizadas (Figura 105), como fonte de informações estruturais do período compreendido entre o Juro-Cretáceo e o recente.

3.6 ANÁLISE DE FAVORABILIDADE

No que diz respeito à base conceitual do modelo estatístico adotado nesta pesquisa (Agterberg 1989), recomenda-se além do trabalho do próprio F.P. Agterberg, o de Bonham-Carter *et al.* (1989) e os de Rostirolla *et al.* (1998) e Rostirolla (1997), estes dois últimos trazendo aplicações do método a alguns casos na exploração mineral e de petróleo no Brasil.

Antes de apresentar algumas características fundamentais do método de ponderação, dois conceitos devem ficar bastante claros, para uma perfeita compreensão dos resultados que serão mostrados no capítulo 6.3. Trata-se dos conceitos de *necessidade* e *suficiência*, os quais são discutidos em detalhe por Rostirolla *et al.* (1998). Uma variável exploratória é dita necessária quando ela está sempre presente nas acumulações conhecidas, enquanto as variáveis suficientes podem ou não existir nas acumulações conhecidas, mas sua presença é considerada como um forte indicativo da acumulação (Figura 28).

Rostirolla (1997) explica que a condição de suficiência de uma variável (evidência *E*) é satisfeita quando a probabilidade de existência do depósito (hipótese *H*) é aumentada com a

existência da variável ($P(H | E) = \text{máximo}$). Já a condição de necessidade da variável é satisfeita quando a probabilidade de não existência do depósito é aumentada com a não existência da variável ($P(\bar{H} | \bar{E}) = \text{máximo}$).

Ou seja, uma variável será considerada altamente necessária na seguinte situação : não ocorrendo a variável, não ocorrerá a acumulação; por outro lado, uma variável será considerada altamente suficiente na seguinte situação : ocorrendo a variável, ocorrerá a acumulação. Idealmente, o geólogo exploracionista deve trabalhar com um conjunto de evidência diagnósticas, que apresentem os mais altos graus de necessidade e suficiência.

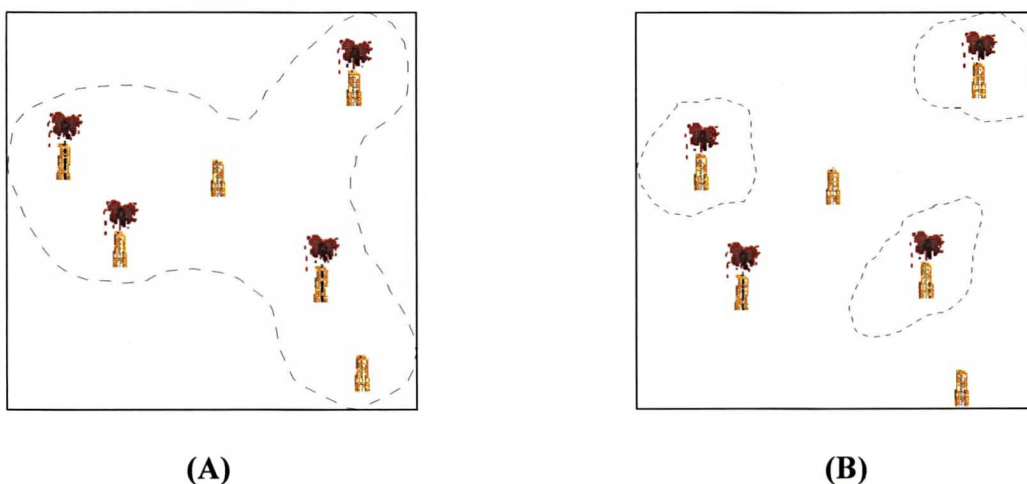


FIGURA 28 - Representação estatística dos conceitos de necessidade e suficiência. Em (A) a área tracejada representa a distribuição de uma variável necessária e em (B), a de uma variável suficiente. Nota-se que as variáveis não representam graus máximos de necessidade e suficiência (idéia adaptada de Rostirolla *et al.* 1998).

O método de ponderação *bayesiana*, o qual segue os princípios da análise probabilística condicional, consiste em determinar a probabilidade de ocorrer um evento (acumulação), dado um condicionante (variável geológica). As celas que contêm as acumulações são consideradas

como um subconjunto do conjunto total de dados, com a estimativa de favorabilidade envolvendo a intersecção entre eventos (acumulação e variável). O peso é representado por uma razão logarítmica entre a probabilidade de ocorrer a acumulação dada a variável, e a mesma probabilidade inexistindo a variável (Agterberg 1989, In : Rostirolla 1996). A favorabilidade é dada pela seguinte expressão :

$$P(H | E_j) = [\exp (\ln Ch(H) + \sum_{j=1}^n \omega_j^k)] / [1 + \exp (\ln Ch(H) + \sum_{j=1}^n \omega_j^k)], \text{ onde :}$$

$P(H | E_j)$ = probabilidade da hipótese H dadas as evidências E_j ;

$Ch (H)$ = chance *a priori* da hipótese H, que é a probabilidade de uma cela conter um poço produtor, dividida pela probabilidade da cela não conter um poço produtor;

"k" é positivo quando a variável é presente e negativo quando é ausente,

com os ponderadores ω_j^k sendo definidos como :

$\omega_j^+ = \ln P(E_j|H)/P(E_j|\overline{H})$; onde $P(E_j|H)/P(E_j|\overline{H})$ é a *suficiência*

$\omega_j^- = \ln P(\overline{E}_j|H)/P(\overline{E}_j|\overline{H})$; onde $1/P(\overline{E}_j|H)/P(\overline{E}_j|\overline{H})$ é a *necessidade*

Nota-se que $\sum_{j=1}^n \omega_j^k$ refere-se ao somatório dos pesos ω^+ das evidência (E) presentes (grau de suficiência), mais o somatório dos pesos ω^- das evidências (E) ausentes (grau de necessidade), para cada cela.

No presente trabalho, o ponderador *bayesiano* foi empregado com o propósito de determinar as condições de necessidade e suficiência das variáveis geológicas, em especial dos lineamentos. O poder destas variáveis como indicadoras de acumulações de petróleo foi investigado através do programa ANAFAV, desenvolvido em *Turbo Basic*.

4 ANÁLISE DOS DADOS DE ESPESSURA

Após a definição das posições espaciais dos dados e efetuar as análises dos perfis compostos e da listagem de topo e base das unidades litoestratigráficas, foram então construídos os bancos de dados de espessuras, posteriormente analisados por métodos matemáticos, estatísticos e geoestatísticos.

Como já destacado, um dos objetivos intermediários deste trabalho foi identificar e discriminar paleolineamentos atuantes nos diferentes períodos da história evolutiva da Bacia do Paraná. Para isto, uma das etapas iniciais envolveu a subdivisão de seu registro estratigráfico em cinco pacotes sedimentares, limitados por superfícies que representam o registro de acontecimentos marcantes e de abrangência bacinal. Como base para este procedimento, foram analisados trabalhos voltados à análise regional da bacia realizados por Soares *et al.* (1978), Soares (1991), Assine *et al.* (1994), Assine (1996) e Milani (1997).

A cada um dos pacotes foi atribuída uma denominação informal para fins de caracterização temporal e praticidade operacional (Tabela 03), tomando-se como base as denominações dadas por Soares (1991). No entanto, vale ressaltar que as sequências tectonossedimentares definidas por este autor, perderam seu significado original com a subdivisão aqui adotada; mesmo com esta ressalva, foram subdivididas em duas partes : uma inferior ("I") e outra superior ("S"). Na Tabela 03 destaca-se a correlação existente entre as sequências consideradas neste trabalho e as unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná.

Com essa subdivisão, será constatado no decorrer do trabalho que os limites das sequências correspondem à superfícies de máxima inundação marinha, ou à superfícies de discordâncias inter-regionais (no sentido de Sloss), ou ainda à discordâncias locais (disconformidades). Esta última, parece ser o caso do limite superior da "Sequência Tectonossedimentar Triássico-Jurássica Inferior". A Sequência Tectonossedimentar

Ordovício-Siluriana não foi investigada neste trabalho devido à pequena quantidade de dados e informações disponíveis, mesmo sabendo que esta seção representa o registro tectonossedimentar mais diretamente relacionado às feições tectônicas do embasamento da bacia.

TABELA 03 - Subdivisão operacional do registro estratigráfico da Bacia do Paraná adotada neste trabalho.

Denominações adotadas neste trabalho	Nomenclatura estratigráfica consagrada
Sequência Tectonossedimentar Devoniano-Mississippiana - Parte Inferior (STD-M-I)	Fm. Furnas até topo do Mb. Jaguariaíva (Fm. Ponta Grossa)
Sequência Tectonossedimentar Devoniano-Mississippiana - Parte Superior (STD-M-S)	Topo do Mb. Jaguariaíva até base do Grupo Itararé
Sequência Tectonossedimentar Pensilvaniano-Permiana - Parte Inferior (STPP-I)	Fm. Lagoa Azul, Fm. Campo Mourão, Fm. Taciba, Fm. Rio Bonito e Fm. Palermo
Sequência Tectonossedimentar Pensilvaniano-Permiana - Parte Superior (STPP-S)	Fm. Serra Alta, Fm. Teresina, Fm. Rio do Rastro/Fm. Sanga do Cabral
Sequência Tectonossedimentar Triássico-Jurássica - Parte Inferior (STTJ-I)	Fm. Pirambóia/ Fm. Santa Maria

Ainda durante essa etapa de análise preliminar dos dados de espessura, foi constatada em alguns perfis de poços a ausência completa ou a não totalidade de uma ou mais unidades litoestratigráficas em determinados pacotes, como reflexo da atuação de processos erosionais recentes; nestes casos o dado foi desconsiderado, a fim de não prejudicar a identificação das reais direções paleo-estruturais. Outro procedimento que poderia ser adotado para possibilitar a utilização destes dados, seria realizar a estimativa de espessuras através do conhecimento da

relação existente entre taxa de sedimentação e tempo de deposição. No entanto, a falta de informações disponíveis inviabilizou a aplicação deste método.

Dois outros problemas enfrentados merecem ser destacados : primeiro, não foi analisada a perda de seção em discordâncias internas (3ª e 4ª ordens), certamente presentes nas sequências delimitadas neste trabalho; segundo, os pacotes sedimentares não foram descompactados, devido à falta de *softwares* apropriados para tal procedimento. Mesmo assim, partiu-se da premissa que as principais descontinuidades presentes na bacia seriam identificadas.

As espessuras correspondentes à Formação Irati (Grupo Passa Dois) foram desconsideradas devido à grande quantidade de intrusivas encontrada nesta unidade, o que poderia prejudicar a qualidade da análise. Além disso, sabe-se que a variabilidade espacial de sua distribuição na bacia é muito pequena.

Além dos bancos de dados de espessuras dos pacotes sedimentares, foi também construído um banco de dados de espessuras das rochas intrusivas básicas concordantes. Consideraram-se somente os dados de poços onde o registro sedimentar apresentava-se quase completo, incluindo ao menos o intervalo correspondente entre as formações Furnas e Botucatu. Com este procedimento, foi possível representar a real disposição espacial das intrusivas e seu controle tectônico na época do evento magmático.

Outra precaução inicial foi quanto à decisão em incluir ou não, valores com espessura nula presentes nas proximidades dos limites de ocorrência de alguns pacotes. Os critérios adotados foram os seguintes : i) aos poços onde a unidade analisada está ausente não foram atribuídos valores de zero metro e ; ii) na faixa de afloramentos foram usados, para a unidade STDM Superior, os pontos onde a unidade desaparece. Na Figura 29 estão ilustradas duas situações, sendo uma permissiva e outra impeditiva quanto à utilização do valor de zero

metro. É importante lembrar que não foram encontrados valores com espessura zero nas porções mais centrais das sequências analisadas, o que poderiam ser indicativos de altos estruturais internos à bacia.

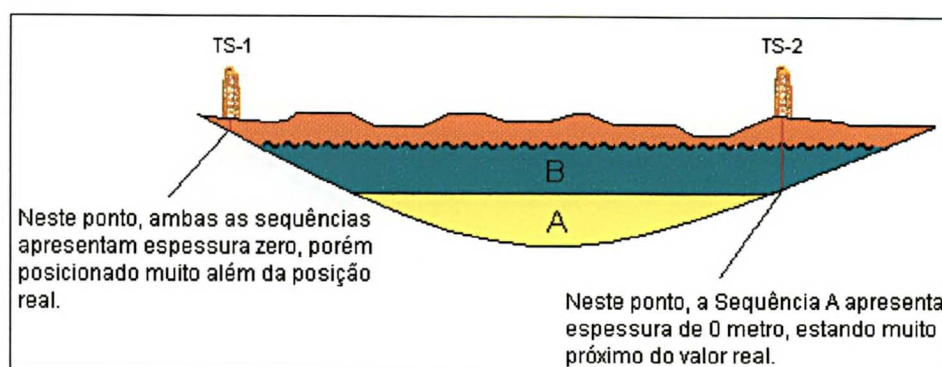


FIGURA 29 - Desenho esquemático representando situações onde valores de espessura de zero metro podem e não, ser utilizados.

Após a construção dos bancos de dados, cada conjunto foi submetido à uma análise estatística descritiva, com a utilização do programa STATISTICA. Trata-se de um procedimento recomendado e de fundamental importância, que deve preceder todo estudo geoestatístico. A análise de cada conjunto de dados possibilitou caracterizar suas populações, além de permitir a identificação de valores anômalos (*outliers*). Proporcionou também, por intermédio de histogramas e tabelas de valores, uma maneira organizada de apresentar os dados e maior facilidade de visualização das principais feições. Os resultados da análise estatística descritiva dos dados brutos estão sumariados na Figura 30 e na Tabela 04. Dados de resíduos obtidos a partir da análise de tendência foram também analisados estatisticamente, e os resultados são apresentados no capítulo 6.

TABELA 04 - Resultados obtidos na análise estatística descritiva dos dados de espessura.

Unidades Analisadas	Análise Estatística Descritiva – Resultados								
	N	m	σ	σ/m	mín.	Q₁	M	Q₃	máx.
STDM-I	32	273,8	94,1	0,3	30	242	307,5	342	385
STDM-S	43	183,4	158,9	0,9	0	41	150	313	556
STPP-I	75	949,4	333,67	0,3	207	747	942	1182	1536
STPP-S	65	813,3	262,1	0,3	168	694	900	969	1223
STTJ-I	56	112,6	90,3	0,8	0	60	84,5	158	365
INTRUSIVAS	50	312,6	223,6	0,7	0	135	258	415	1078

N : número de casos; **m** : média aritmética; **σ** : desvio-padrão; **σ/m** : coeficiente de variação; **mín.** : valor mínimo; **Q₁** : quartil inferior; **M** : mediana; **Q₃** : quartil superior; **máx.** : valor máximo.

Após a análise dos resultados estatísticos obtidos, algumas constatações foram feitas :

- a) as distribuições dos dados da STDM-I, STDM-S, STTJ-I e das INTRUSIVAS são tipicamente assimétricas e unimodais. Observou-se que as populações destes três últimos pacotes apresentam assimetria positiva, ou seja, há uma proporção progressivamente menor de valores de espessura relativamente mais altos; nestes pacotes, os valores da média são maiores que os da mediana. Já a STDM-I mostra assimetria negativa e valor de mediana maior que o da média;
- b) a STPP-I constitui-se, aparentemente, por duas sub-populações, sendo a primeira abrangendo o intervalo entre 200-800 m e a segunda entre 800-1550 m;
- c) a população de dados da STPP-S caracteriza-se pela nítida bimodalidade e assimetria negativa (mediana maior que a média). Ao que parece, ocorre uma mistura de duas sub-populações com diferentes médias e desvios-padrões (talvez cada uma com

distribuição normal), o que seria indicativo de distribuição bimodal; as modas de valores mais baixos são bem mais discretas;

- d) através do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, todos os conjuntos de dados, com exceção da STTJ-I, mostraram-se não consistentes com a hipótese de distribuição normal.

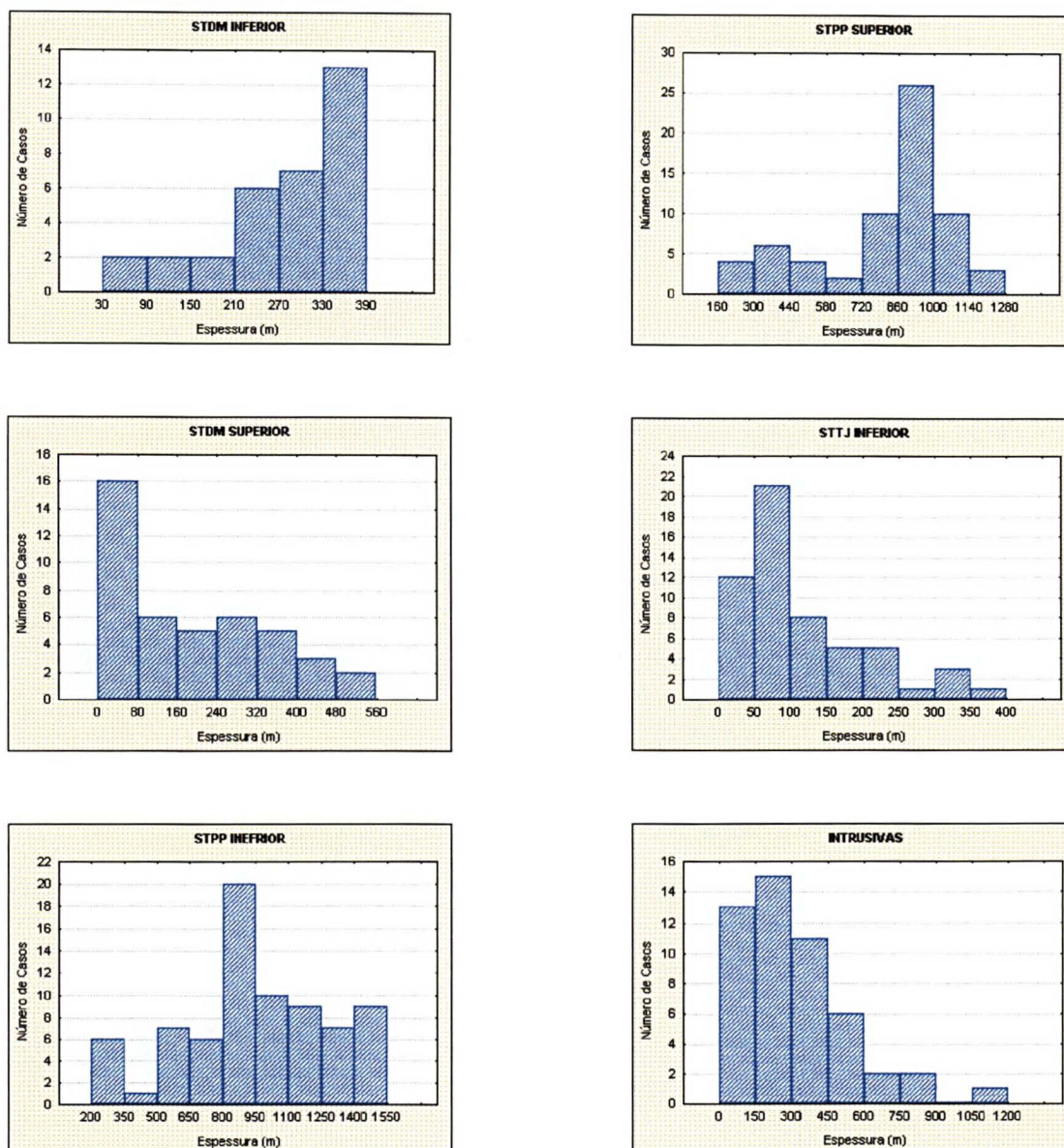


FIGURA 30 - Histogramas das distribuições das espessuras. Comentários no texto.

4.1 TENDÊNCIAS REGIONAIS

Todas as unidades analisadas estatisticamente no capítulo anterior foram submetidas à análise de tendência. Com este procedimento, os dois objetivos a serem alcançados foram :

i) identificar e caracterizar controles tectônicos de escala regional, atuantes durante a sedimentação e erosão dos pacotes sedimentares e durante o alojamento das intrusivas concordantes e; ii) obter valores residuais de espessura a fim de analisá-los sob a ótica da geoestatística.

Diversos mapas de tendência foram gerados na tentativa de compreender a complexidade da variabilidade espacial dos dados. Considerou-se que a distribuição espacial de fenômenos de escala regional em bacias intracratônicas, como por exemplo arqueamentos e embaciamentos, seria suficientemente bem explicada até, no máximo, por superfícies de 3ª ordem.

Os valores de ajuste das superfícies de tendência para cada unidade analisada foram obtidos no ROCKWORKS, e são apresentados na Figura 31 e Tabela 05. Observa-se não haver mais significado estatístico além dos valores de ajuste destacados em negrito na tabela.

Para as unidades STPP-I e STPP-S as superfícies de maior incremento são as de 2ª ordem, as quais explicam mais de 85% das distribuições. Para as unidades STD-M-I e INTRUSIVAS, a superfície de 3ª ordem apresentou o melhor ajuste da tendência regional, com pouco mais de 80% de explicabilidade, e nas unidades STD-M-S e STTJ-I somente as superfícies de 4ª foram capazes de explicar em torno de 80 % das distribuições.

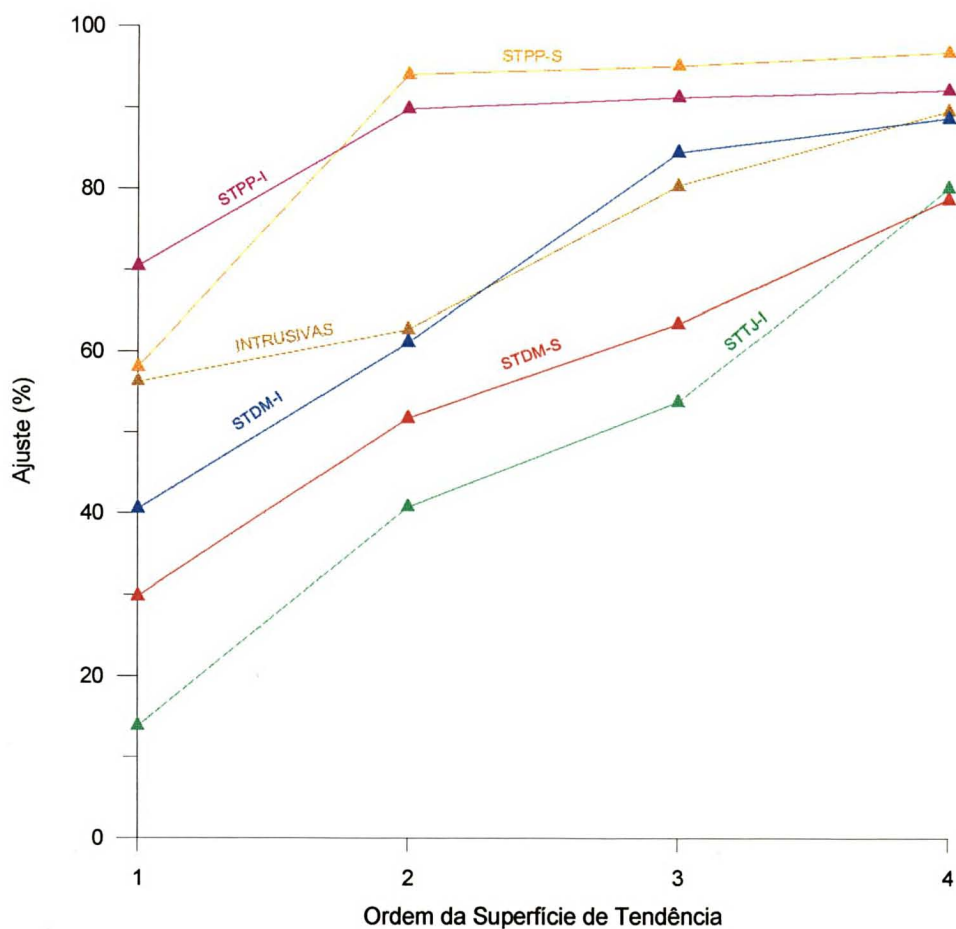


FIGURA 31 - Gráfico ilustrando os ajustes obtidos com as análises de tendência de primeira a quarta ordem sobre os dados de espessura.

TABELA 05 - Resultados numéricos dos ajustes obtidos.

Unidades analisadas	Ajustes obtidos nas análises de tendência (%)			
	1ª ordem	2ª ordem	3ª ordem	4ª ordem
STDM-I	40,4	58,4	85,5	88,9
STDM-S	30,7	50,9	64,5	78,4
STPP-I	70,4	89,9	91,5	92,5
STPP-S	58,0	94,2	95,4	97,2
STTJ-I	13,8	40,8	53,9	80,4
INTRUSIVAS	56,2	62,8	80,6	89,9

Para cada conjunto de dados foram gerados mapas de tendência no SURFER, sendo que o número de mapas foi definido de acordo com os ajustes obtidos em cada sequência (Tabela 06). Os mapas são apresentados logo a seguir.

TABELA 06 - Tipos de mapas de tendência gerados a partir dos dados de espessura.

Unidades analisadas	Mapas de tendência			
	<i>1ª ordem</i>	<i>2ª ordem</i>	<i>3ª ordem</i>	<i>4ª ordem</i>
STDM-I				
STDM-S				
STPP-I				
STPP-S				
STTJ-I				
INTRUSIVAS				

Para cada mapa gerado houve a preocupação em evitar a estimativa de valores além dos pontos de controle. Para isso, os dados de cada conjunto foram plotados na tela do computador, juntamente com os contornos limítrofes da Bacia do Paraná, sendo em seguida demarcadas sub-áreas em número suficiente para cobrir a quase totalidade dos dados.

As coordenadas de cada sub-área foram então anotadas e fornecidas ao programa, para que este efetuasse os cálculos necessários para a geração do *grid*; o conjunto de *grids* é que constituiu o mapa de tendência final. Quanto às suas dimensões, optou-se por um espaçamento de 15 km entre cada valor a ser calculado. Nos capítulos seguintes poderá ser constatado que este valor, a princípio muito grande, encontra-se bastante aquém das áreas de influência definidas nos estudos geoestatísticos de cada pacote.

STDM INFERIOR

Para esta unidade foram gerados três mapas de tendência, de 1ª a 3ª ordem (Figura 32), onde verificou-se um bom ajuste da superfície de grau 3 (85,5%). Algumas feições importantes reveladas por esta técnica foram analisadas :

- a) a porção noroeste da bacia caracteriza-se, nos três mapas, por baixos valores de espessura, sendo que no mapa de tendência de 3ª ordem fica bem delineada um traço de borda parabólica, em forma côncava voltada para oeste (estado de Mato Grosso do Sul), com direção principal NNE;
- b) além da borda noroeste ficaram bem evidentes no mapa de 3ª ordem, uma borda retilínea com direção NNW, delimitando a bacia a nordeste e uma borda sul na altura de Santa Catarina, definida com direção geral EW;
- c) no mapa de 2ª ordem ocorre uma calha bem delimitada com direção NNE, que não mais aparece no mapa de 3ª ordem; considerando o pequeno ajuste obtido na primeira (58,4%), tal feição não deve representar a realidade do fenômeno;
- d) por outro lado, o bom ajuste obtido com a superfície de 3ª ordem permitiu identificar a presença de três sub-bacias, aparentemente interligadas; a principal delas situa-se no norte do Paraná, alongada na direção NNW, outra no estado de Mato Grosso apresentando direção NS e a terceira no Paraguai.

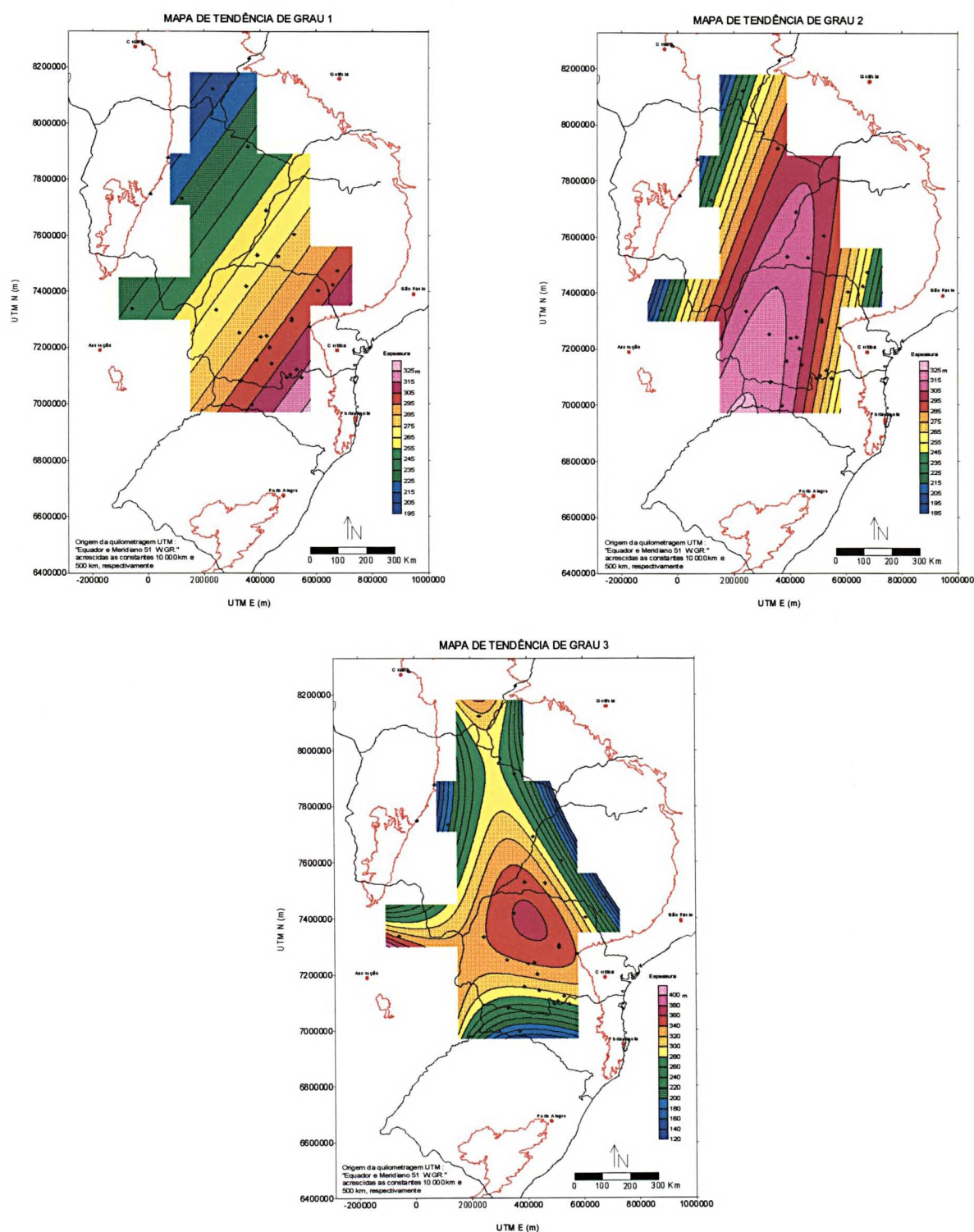


FIGURA 32 - Mapas de tendência de 1ª (40,4%), 2ª (58,4%) e 3ª ordem (85,5%) da unidade STDm Inferior.

STDM SUPERIOR

Para o pacote devoniano superior foram construídos quatro mapas de tendência, de 1ª a 4ª ordem (Figura 33), sendo notável os baixos ajustes obtidos até a superfície de 3ª ordem, o que parece refletir a complexidade da distribuição dos valores de espessura. As características mais significativas observadas foram :

- a) a tendência, verificada desde a superfície planar, em ocorrer valores de espessura maiores para o quadrante SW e menores para o quadrante NE;
- b) a presença de três bordas bem definidas, separando os valores altos dos baixos : a primeira com direção NNW, é retilínea e aparece nos mapas de 3ª e 4ª ordens, limitando a bacia a nordeste; a segunda marca o limite sul da bacia, delineada a norte de Santa Catarina; e a terceira apresenta forma parabólica, ocorrendo ao sul do Mato Grosso do Sul;
- c) nos mapas de 3ª e 4ª ordens os maiores valores de espessura mostram-se alinhados numa faixa com direção NNW, refletindo a tendência de acumulação regional e/ou preservação do pacote devoniano superior;
- d) a presença de três sub-bacias interligadas, posicionadas nas regiões centro-norte do Paraná (principal), sudeste do Mato Grosso e Paraguai;
- e) a notável semelhança entre as configurações do mapa de tendência de 3ª ordem da STDM Inferior e o mapa de 4ª ordem da STDM Superior.

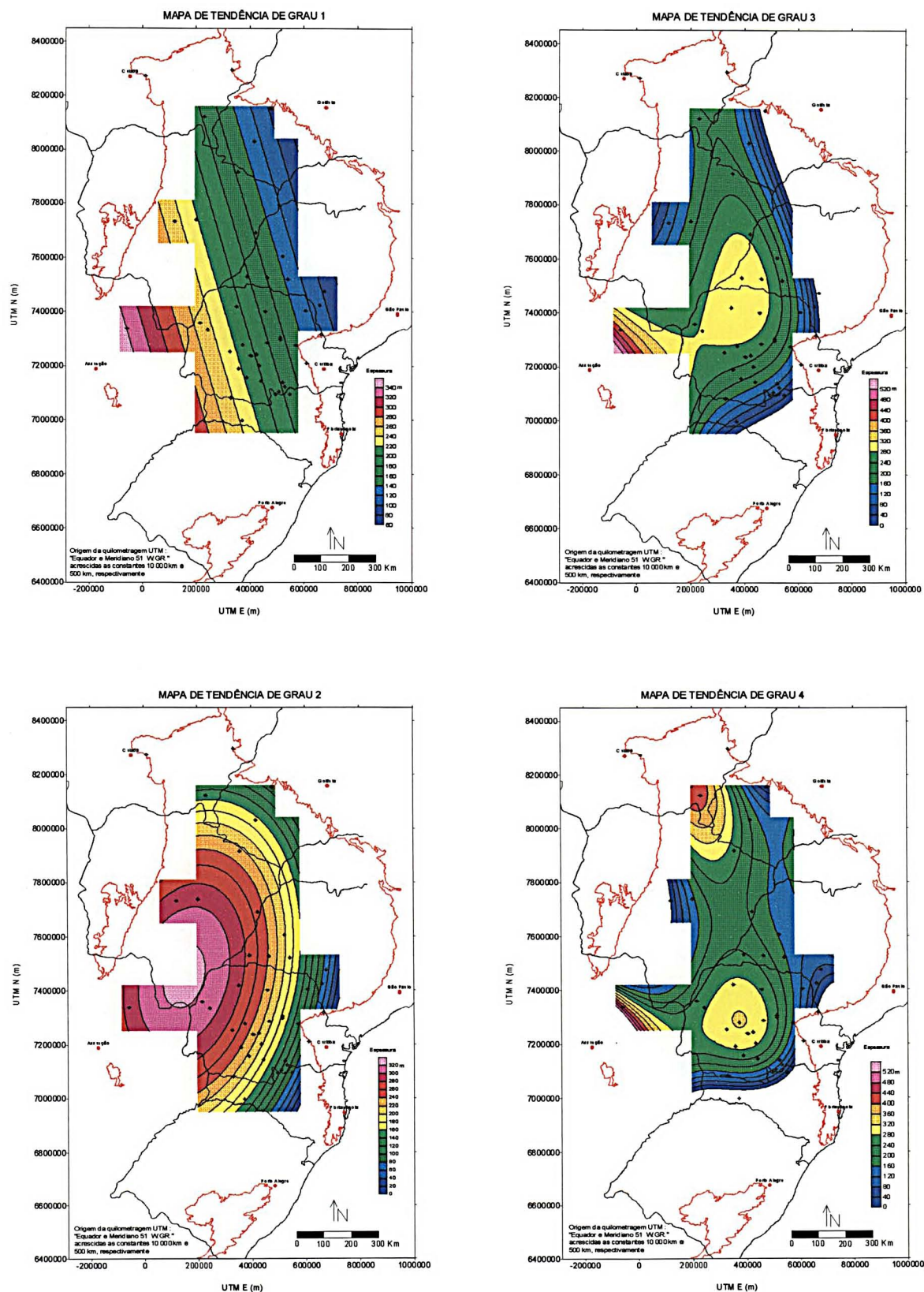


FIGURA 33 - Mapas de tendência de 1ª (30,7%), 2ª (50,9%), 3ª (64,5%) e 4ª ordem (78,4%) da unidade STDM Superior.

STPP INFERIOR

Os mapas de tendência apresentam um bom ajuste das superfícies de 1ª e 2ª ordens (Figura 34), sendo que a partir desta o incremento torna-se muito baixo. Este fato poderia revelar uma certa simplicidade da distribuição dos fenômenos de escala regional, ou ainda ser decorrente da máscara representada pelas elevadas espessuras da unidade, as quais tendem a sobrevalorizar o coeficiente de correlação. As feições observadas são descritas a seguir :

- há uma tendência regional em ocorrer valores maiores de espessura, encaixados numa calha com direção EW, localizada ao norte do estado do Paraná; afastando-se em direção ao sul e ao norte desta calha, os valores de espessura tendem a diminuir;
- a borda noroeste que aparecia nos mapas das sequências devonianas, não mais ocorre nesta sequência; nesta região os sedimentos tendem a se acumular com maior espessura.

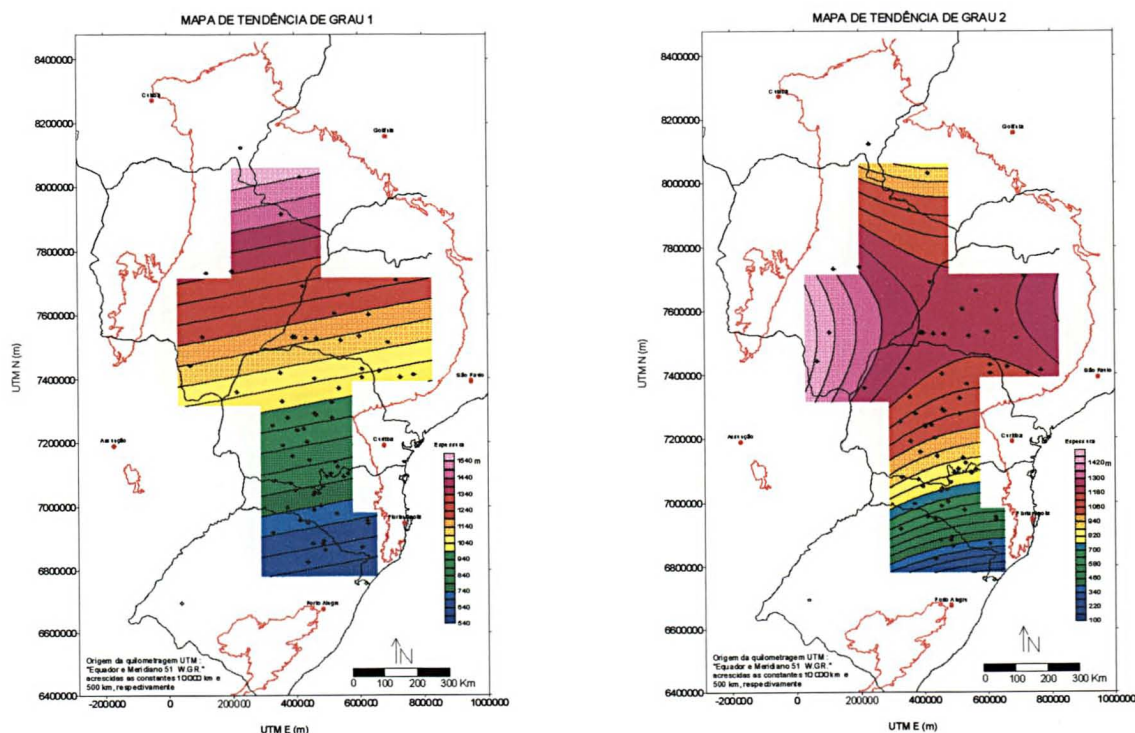


FIGURA 34 - Mapas de tendência de 1ª (70,4%) e 2ª ordem (89,9%) da unidade STPP Inferior.

STPP SUPERIOR

Para esta unidade foram gerados dois mapas de tendência, de 1ª e 2ª ordem (Figura 35), sendo que a superfície parabólica apresentou ajuste de quase 95% sobre a distribuição. As feições reveladas nestes mapas foram as seguintes :

- tendência de crescimento dos valores em direção ao quadrante sudoeste, observada nos dois mapas. Tal evidência difere bastante daquilo que foi constatado na sequência inferior, onde os valores tendiam a crescer para norte;
- no mapa de 2ª ordem observa-se que a região de maior acumulação e/ou preservação da sequência encontra-se a oeste do Paraná; tal feição mostra-se estruturada na direção NS e, aparentemente, encontra-se toda rodeada por valores menores de espessura; esta estruturação NS difere bastante daquela observada no mapa de tendência de 2ª ordem da STPP Inferior, a qual caracterizava-se por um arranjo EW.

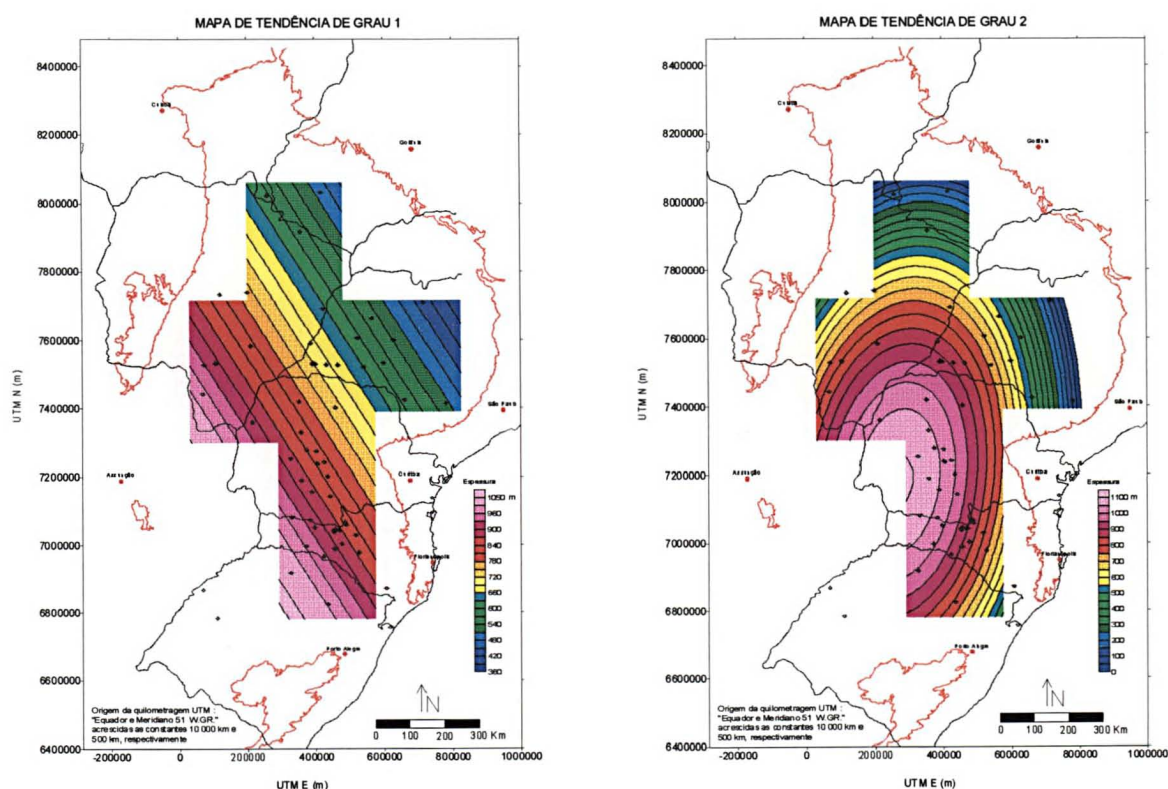


FIGURA 35 - Mapas de tendência de 1ª (58%) e 2ª ordem (94,2%) da unidade STPP Superior.

STTJ INFERIOR

As superfícies de tendência mostraram baixo grau de explicabilidade da distribuição; somente com a superfície de 4ª ordem é que se atingiu um ajuste de 80% (Figura 36). Algumas considerações foram feitas com base nesses mapas :

- a) há uma tendência geral, observada nos quatro mapas, de diminuição dos valores de espessura em direção ao quadrante sudeste;
- b) no mapa de tendência de 4ª ordem, aparece um alto com forma parabólica e direção geral NW, posicionado a leste dos estados do Paraná e Santa Catarina;
- c) contornando esta estrutura, ocorre um cinturão de maior acúmulo de espessuras, caracterizado pela presença de embaciamentos descontínuos; é limitado a oeste por uma faixa NS de baixos valores.

INTRUSIVAS

Para analisar a distribuição regional das intrusivas alojadas em meio aos pacotes sedimentares, foram gerados três mapas de tendência, de 1ª a 3ª ordem (Figura 37), verificando-se uma maior incremento de ajuste com a superfície de grau 3 (80,6%). As características mais marcantes são descritas abaixo :

- a) as maiores espessuras acumuladas tendem a se concentrar no quadrante WNW;
- b) observa-se no mapa de 3ª ordem que a faixa representada pelos valores mais altos de espessura, mostra-se alongada na direção NNE, passando pelo oeste do Paraná e sudeste do Mato Grosso do Sul;
- c) já os menores valores tendem a ocorrer na região central de Santa Catarina e nordeste do Rio Grande do Sul; constitui uma faixa que vai até o estado de São Paulo, com direção NNE.

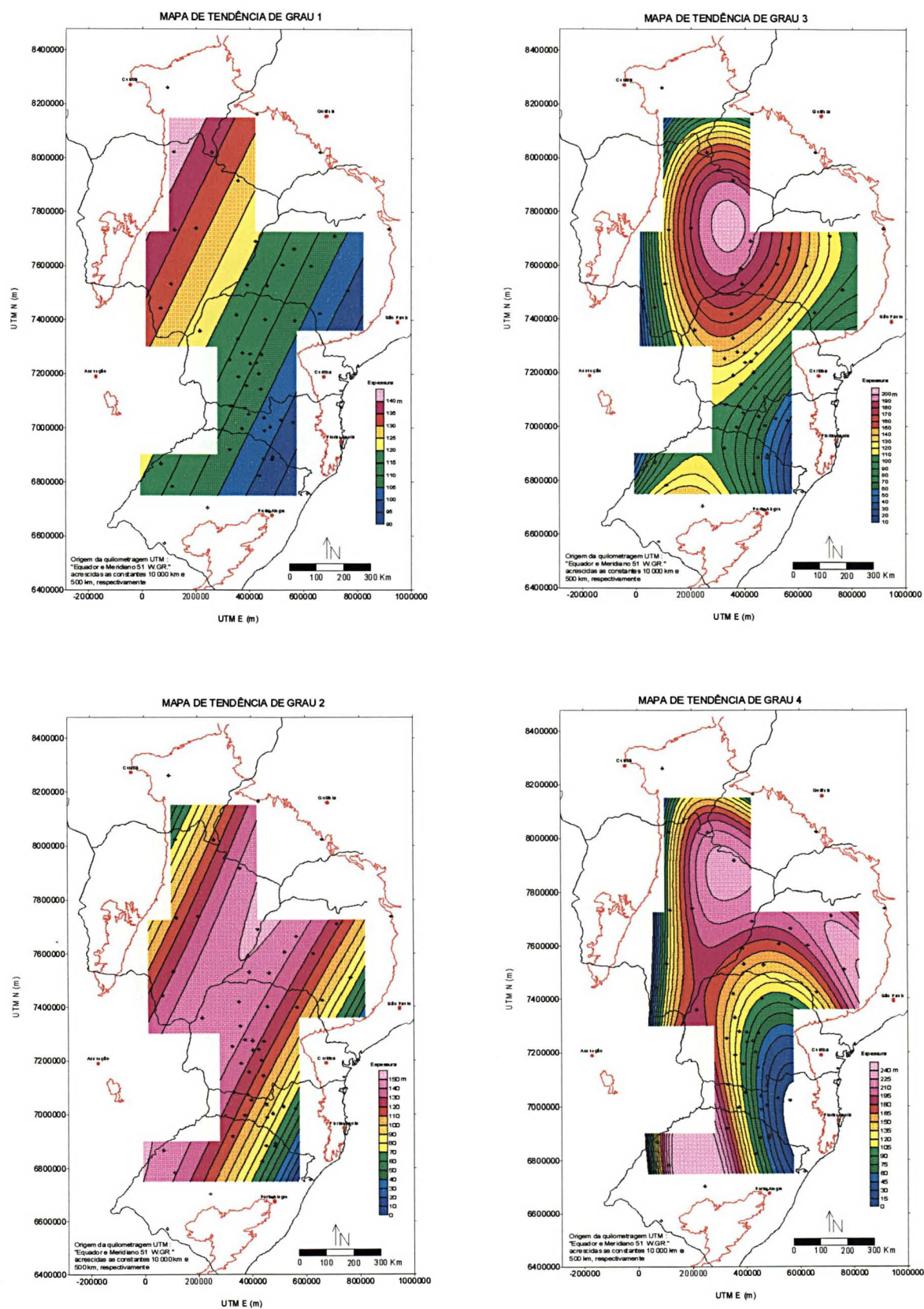


FIGURA 36 - Mapas de tendência de 1ª (13,8%), 2ª (40,8%), 3ª (53,9%) e 4ª ordem (80,4%) da unidade STTJ Inferior.

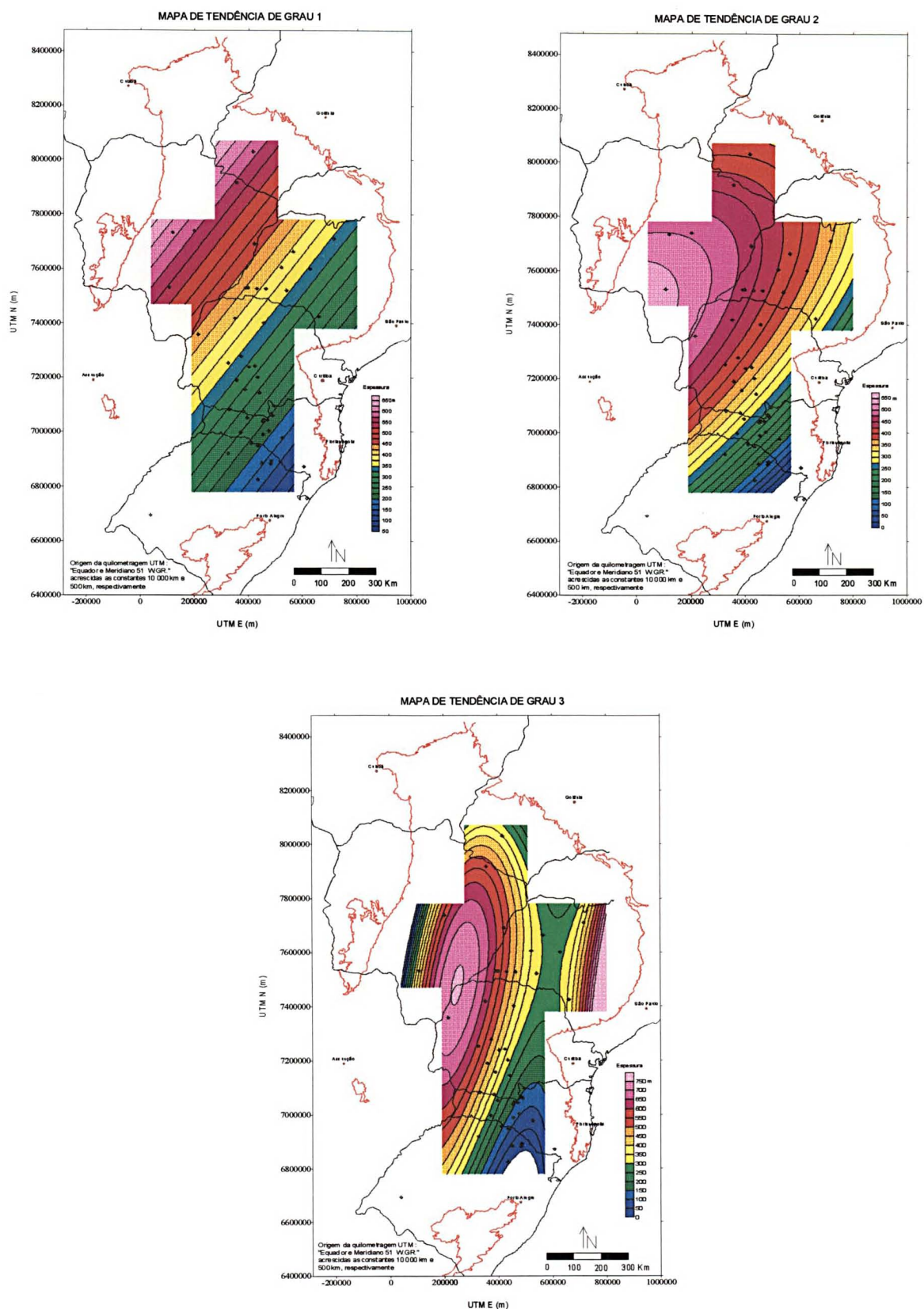


FIGURA 37 - Mapas de tendência de 1ª (56,2%), 2ª (62,8%) e 3ª ordem (80,6%) mostrando a distribuição regional das rochas intrusivas.

Após a análise e interpretação dos fenômenos de amplitude bacinal (capítulo 6), o passo seguinte foi verificar a continuidade espacial dos resíduos, que com a retirada da tendência regional, passaram a representar anomalias de espessura locais.

O reconhecimento de estruturas de grande amplitude por intermédio da análise de tendência, e a retirada destes *trends* regionais para efetuar os estudos geoestatísticos, facilitou a caracterização dos principais paleolineamentos que teriam influenciado a sedimentação e a modificação dos pacotes rochosos.

4.2 CONTINUIDADE ESPACIAL

No presente trabalho foi adotada a técnica de análise variográfica das espessuras, com o objetivo de identificar direções estruturais que tenham controlado a formação ou modificação dos pacotes rochosos, em diferentes intervalos do tempo geológico. Partiu-se da premissa de que paralelamente às direções estruturais controladoras, a variabilidade das espessuras deveria ser menor (maior continuidade) que nas demais direções. O *software* utilizado em todas as etapas da análise variográfica foi o VARIOWIN.

O primeiro passo foi escolher as variáveis que seriam utilizadas na análise variográfica. Para cada um dos conjuntos de dados foram construídos semivariogramas omnidirecionais, com o objetivo de verificar a hipótese da estacionaridade das variáveis.

Ao utilizar como variável regionalizada os dados brutos de espessura, verificou-se em todos os semivariogramas omnidirecionais a presença do efeito-deriva, em maior ou menor grau, comprovando-se a influência de tendências regionais de grande amplitude. A presença do efeito-deriva foi também constatada com a construção dos semivariogramas direcionais. Os gráficos semivariogramas são apresentados ao final deste capítulo.

Verificou-se portanto, a necessidade em retirar-se as tendências regionais (embaciamentos, arqueamentos) dos dados através da análise de tendência, para que as variáveis se tornassem estacionárias. Feito isto, os resíduos obtidos passaram a ser analisados e considerados com sendo as variáveis estacionárias transformadas.

Uma das maiores dificuldades encontradas durante a análise da variabilidade espacial dos resíduos de espessura, está associada à quantidade e irregularidade na distribuição dos dados disponíveis. Nas sequências inferiores representadas pelas STDM-I e STDM-S surgiram muitos problemas para se obter semivariogramas robustos e confiáveis, principalmente na origem, devido à pequena quantidade de dados de poços e à falta de informações para curtas distâncias entre eles. Foram efetuadas complementações com dados de superfície obtidos com o levantamento de seções de campo (Assine 1996, Soares com. ver.), exclusivamente em locais próximos às bordas atuais da bacia.

Para verificar a presença ou não de anisotropias nos fenômenos estudados foram calculados inicialmente, seis semivariogramas direcionais (EW, N60E, N30E, NS, N30W e N60W) para cada um dos conjuntos de dados. Após muitas tentativas foram definidos os parâmetros de tolerância angular e no passo, a serem empregados no cálculo dos semivariogramas direcionais definitivos de cada pacote. Tais parâmetros são apresentados na Tabela 07.

TABELA 07 - Variáveis e parâmetros utilizados no cálculo dos semivariogramas direcionais.

Unidades Analisadas	VARIÁVEL	LIMITES DE TOLERÂNCIA	
		<i>DIREÇÃO</i>	<i>DISTÂNCIA</i>
STDM-I	resíduo de 3ª ordem	$\pm 60^\circ$	70 ± 70 km
STDM-S	resíduo de 3ª ordem	$\pm 40^\circ$	70 ± 80 km
STPP-I	resíduo de 2ª ordem	$\pm 40^\circ$	90 ± 90 km
STPP-S	resíduo de 2ª ordem	$\pm 45^\circ$	60 ± 60 km
STTJ-I	resíduo de 3ª ordem	$\pm 60^\circ$	50 ± 60 km
INTRUSIVAS	resíduo de 3ª ordem	$\pm 45^\circ$	80 ± 80 km

Observa-se que as tolerâncias angular e no passo são grandes, o que certamente provocou alguma distorção na estrutura dos semivariogramas. Porém, para que os valores-semivariograma fossem mais consistentes, tal procedimento foi necessário. Levando-se em consideração este problema, na etapa inicial da análise variográfica foram efetuados alguns testes para verificar o grau de distorção sofrido pelos constituintes estruturais dos semivariogramas (alcance e patamar). Para cada conjunto de dados foram elaborados diversos semivariogramas direcionais, e em cada um foram feitas contínuas alterações nas tolerâncias linear e angular.

Na Tabela 07 verifica-se que as tolerância no passo apresentam o mesmo valor do próprio passo, ou até pouco maior. Tal procedimento, não muito habitual, pode ser considerado como a aplicação de uma média móvel (Figura 38). Ou seja, alguns valores utilizados no cálculo de $\gamma(h_1)$ também os foram no cálculo de $\gamma(h_2)$. Esta prática certamente causa uma suavização dos valores a serem estimados, atuando como uma superfície de tendência para o cálculo do valor-semivariograma. Contudo, a intenção foi exatamente esta, ou seja, identificar tendências na estruturação dos valores de resíduo para as diferentes direções.

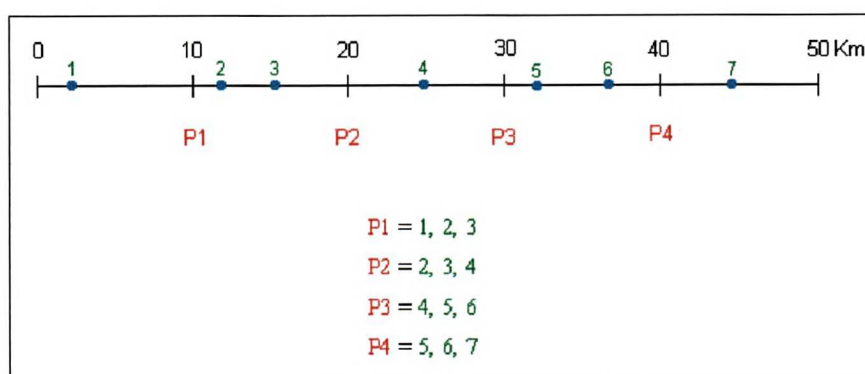


FIGURA 38 - Exemplo da técnica de média móvel para o passo adotada neste trabalho. A distância e a tolerância entre os passos são de 10 km. P1, P2, P3 e P4 são os passos e 1, 2, 3, 4 são as amostras utilizadas para os cálculos.

Após estas observações iniciais, constatou-se que *até certo ponto*, mesmo aumentando-se as tolerâncias a estrutura geral do semivariograma permanecia a mesma, porém contendo maior número de pares em cada valor-semivariograma e melhor definição. Tal fato permitiu a utilização das tolerâncias ilustradas na tabela anterior.

Uma feição marcante e consistente verificada nos semivariogramas de algumas das sequências analisadas, foi o chamado efeito-de-buraco, o qual indica a presença de uma componente periódica nos fenômenos, como por exemplo, intercalações entre faixas com maior e menor espessura.

Outra feição interessante observada em todas as unidades analisadas, foi o aparecimento do fenômeno de imbricação nos semivariogramas, ou seja, a presença de estruturas superpostas com diferentes regionalizações ou ordens de grandeza. Revelado este fenômeno, primeiramente procedeu-se à definição de todos os parâmetros que caracterizassem as maiores estruturas registradas nos conjuntos de dados; estas apresentaram magnitude em torno de duas a quatro centenas de quilômetros.

Após esta etapa, buscou-se com a diminuição das distâncias de combinação entre os pares de amostras, buscar estruturas de pequeno porte (micro-regionalizações), que poderiam revelar controles tectônicos locais. Tais estruturas foram identificadas em algumas sequências e posteriormente foram modeladas; todas apresentaram magnitude de menos de uma centena de quilômetros. Os parâmetros utilizados para a construção desses semivariogramas são apresentados na Tabela 08. Não foi possível modelar os semivariogramas da STDM-I devido à insuficiência de pares formados à curtas distâncias e, também, aqueles da STPP-S e STTJ-I por motivo de ausência de definição das micro-regionalizações.

A decisão de tratar em separado as macro e micro-estruturas e obter semivariogramas e mapas distintos, foi devido a dois motivos principais : i) definição mais clara dos controles

estruturais de escala local, sem nenhuma interferência das estruturas maiores e; ii) grande dificuldade em se ajustar um único modelo teórico de maneira satisfatória, devido à ocorrência em conjunto de anisotropias zonal/geométrica e estruturas imbricadas.

Observou-se ainda, que mesmo trabalhando-se com resíduos, algumas feições da estruturação regional ainda permaneceram embutidas nos dados e, conseqüentemente, ficaram registradas nos mapas gerados.

TABELA 08 - Variáveis e parâmetros utilizados no cálculo dos semivariogramas para pequenas estruturas.

Unidades Analisadas	VARIÁVEL	LIMITES DE TOLERÂNCIA	
		<i>DIREÇÃO</i>	<i>DISTÂNCIA</i>
STDM-I	resíduo de 3 ^a ordem	omnidirecional	20 ± 30 km
STDM-S	resíduo de 3 ^a ordem	± 60°	20 ± 20 km
STPP-I	resíduo de 2 ^a ordem	± 40°	10 ± 20 km
STPP-S	resíduo de 2 ^a ordem	omnidirecional	10 ± 20 km
STTJ-I	resíduo de 3 ^a ordem	omnidirecional	10 ± 20 km
INTRUSIVAS	resíduo de 3 ^a ordem	± 45°	30 ± 30 km

A partir da definição de todos esses parâmetros básicos, o passo seguinte foi analisar os semivariogramas direcionais e selecionar, em cada pacote, aqueles correspondentes às direções de maior e menor continuidade espacial. Com base no conjunto de seis semivariogramas analisados a princípio, já foi possível se ter uma noção dos quadrantes que conteriam os eixos de anisotropia. Após esta verificação, foram então construídos novos semivariogramas em torno das prováveis direções de anisotropia, para que fossem definidas com maior precisão.

Finalmente definidas as direções para as estruturas de grande e pequena amplitude, procedeu-se ao ajuste de modelos variográficos teóricos aos semivariogramas experimentais.

Verificou-se no decorrer da modelagem, que o modelo de Gauss ou gaussiano foi o que melhor se ajustou à maioria dos semivariogramas experimentais. Poucos foram ajustados com a utilização do modelo esférico.

Observou-se com frequência nos semivariogramas, o aparecimento de efeitos-deburaco, estruturas imbricadas e anisotropias zonal e geométrica. A modelagem de semivariogramas experimentais com a presença conjunta de anisotropias zonal e geométrica, foi uma prática muito comum neste trabalho e desenvolvida graças ao suporte dado pelo *software* utilizado. A janela de trabalho proporcionada pelo VARIOWIN está ilustrada na Figura 39.

The screenshot displays the VARIOWIN software interface for model fitting. At the top, a box titled 'Indicative goodness of fit' shows 'current fit: 1.3578e-02' and 'best fit found: 5.4361e-03'. Below this is a 'Nugget: 0.4' slider. The main area is divided into three columns for '1st structure', '2nd structure', and '3rd structure'. Each column contains a 'Dir.' slider (all set to 60), a 'Model' dropdown (Spherical, Exponential, Spherical), a 'Range' slider (100, 500, 1600), a 'Sill' slider (0.4, 0.95, 0.9), and an 'Anis.' slider (3, 3, 1000). At the bottom, there are 'Store', 'Restore', and 'Best fit found' buttons, and a box for 'A priori Cov./Corr. >>'.

FIGURA 39 - Exemplo de uma modelagem desenvolvida no Variowin 2.2 (Pannatier 1994).

A seguir são apresentados os semivariogramas e os modelos ajustados em cada sequência analisada, e no capítulo seguinte, os parâmetros variográficos obtidos com as modelagens.

STDM INFERIOR

Como já relatado, foram utilizados os dados de resíduo de grau 3 durante o desenvolvimento da análise variográfica. Os parâmetros estatísticos obtidos com a análise desta variável são apresentados na Figura 40 juntamente com aqueles dos dados brutos, para fins de comparação. A distribuição dos resíduos passou no teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*

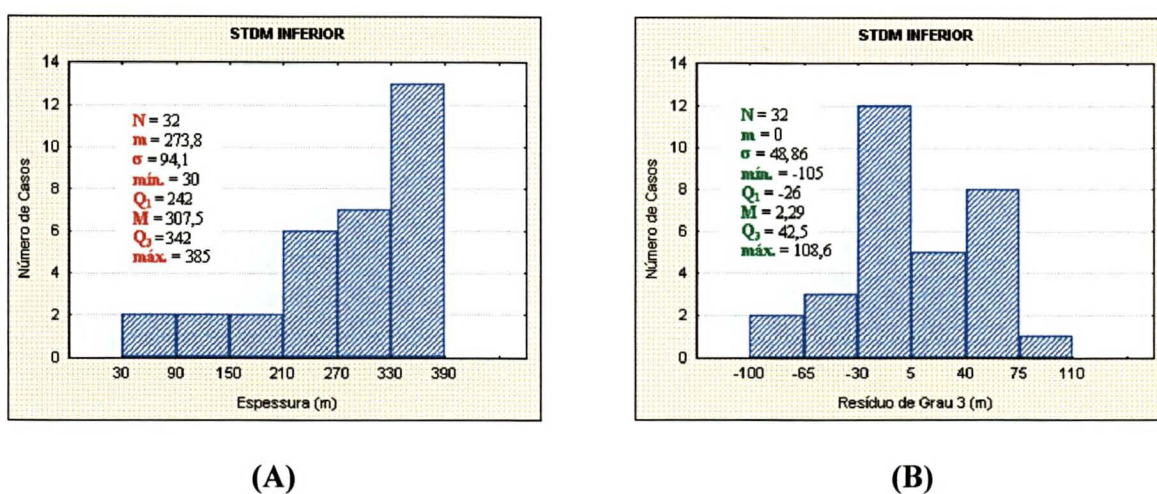


FIGURA 40 - Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).

Os primeiros semivariogramas a serem construídos foram os omnidirecionais (Figura 41) com a intenção de se verificar a hipótese de estacionaridade e obter uma idéia da estruturação média do fenômeno. Apesar do semivariograma dos dados brutos apresentar melhor estruturação, optou-se em proceder a análise com a utilização da variável resíduo, já que o objetivo foi caracterizar estruturas não relacionadas a *trends* regionais.

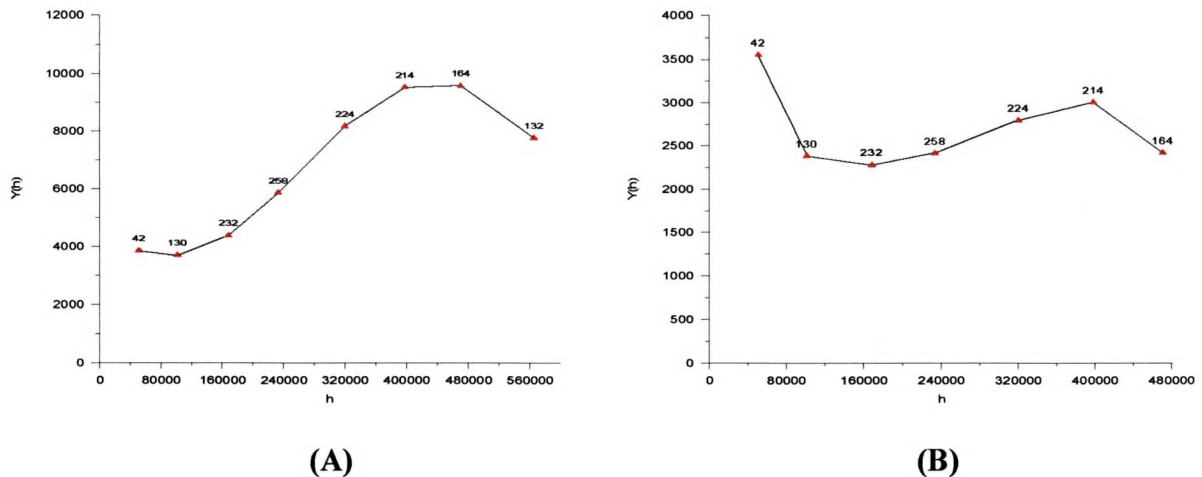


FIGURA 41 - Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 3 (B). Em ambos foram adotados passos de 80 ± 80 km.

Observa-se que o semivariograma dos resíduos de grau 3 apresenta o primeiro valor numa posição mais alta que os seguintes, possivelmente indicando a presença de estruturas com dimensões aquém do passo utilizado.

Com base na análise visual dos semivariogramas direcionais (Figura 42), foi possível chegar a algumas conclusões :

- em todos, observou-se um alto valor de efeito-pepita e também o efeito-de-buraco próximo à distância de 140 km, provavelmente indicando a presença de estruturas de menor ordem de grandeza;
- ao que parece, os alcances nas diferentes direções não variam, o que indicaria que o fenômeno na escala analisada é isotrópico;
- os semivariogramas construídos para a direção geral noroeste apresentam os mais baixos valores de variância, ou seja, a diferença quadrática entre valores combinados nesta direção é menor, por serem mais semelhantes entre si.

Para fins de constatação, os dados brutos e os resíduos de 1ª ordem também foram analisados e os semivariogramas resultantes indicaram haver uma faixa de maior continuidade ou menor variabilidade espacial, disposta nitidamente em torno da direção N30W. Naturalmente, esta deve corresponder à direção que controlou a sedimentação do Devoniano Inferior na bacia, a nível regional.

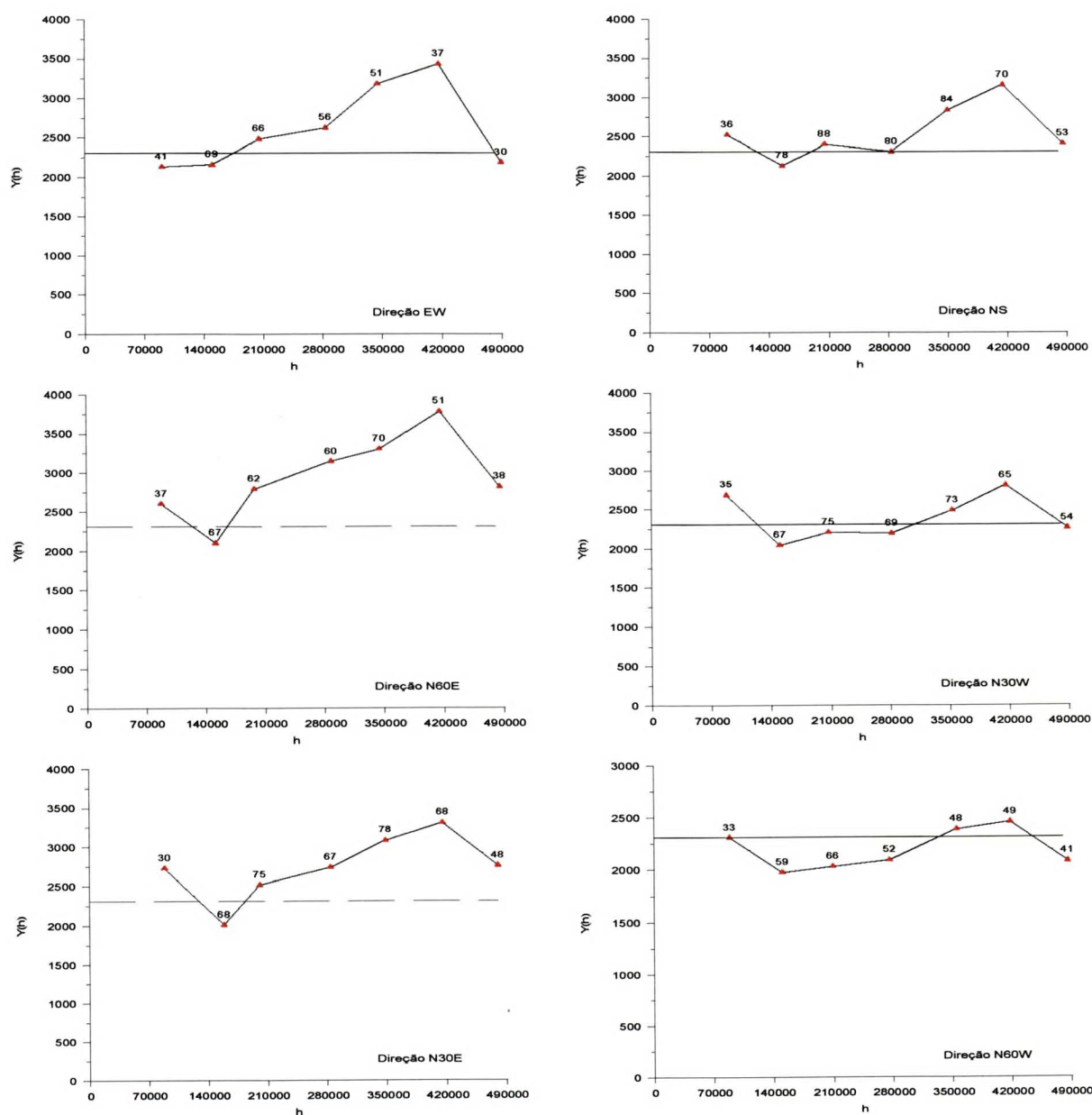


FIGURA 42 - Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3 da STDm Inferior. Passos de 70 ± 70 km e tolerância angular de 60° .

Para a modelagem foi escolhido o semivariograma omnidirecional dos resíduos de grau 3, já que não foi possível determinar com segurança as direções de maior e menor continuidade espacial. Observa-se na Figura 43 o fenômeno de imbricação e a preferência em melhor ajustar a curva aos valores-semivariograma mais distanciados, já que o objetivo neste caso foi mapear estruturas de grande porte. Por este motivo, os valores mais próximos à origem ficaram pouco distanciados do modelo ajustado.

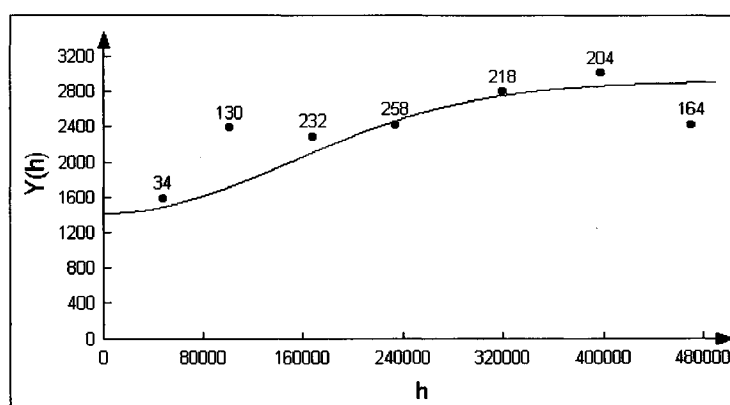
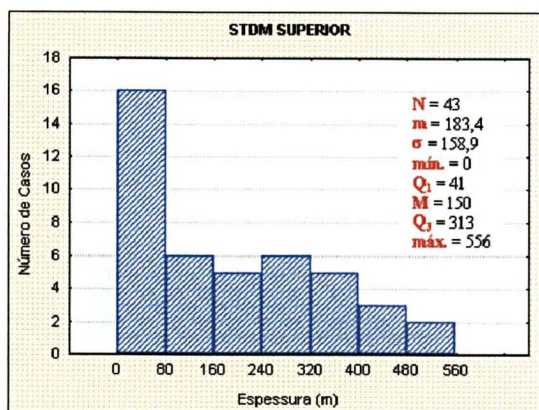


FIGURA 43 - Modelagem do semivariograma omnidirecional ajustado à estrutura bacinal. Passos de 80 ± 80 km.

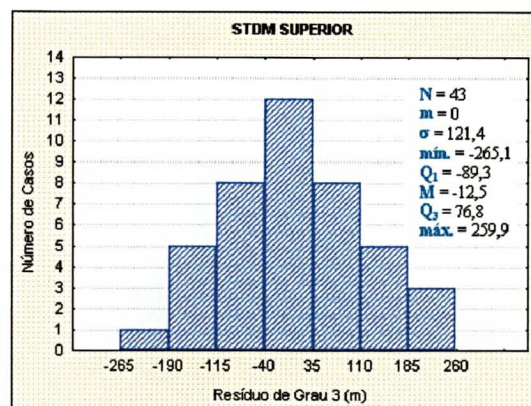
STDM SUPERIOR

Para a análise desta sequência foram utilizados os dados de resíduo de grau 3. Os resultados provindos da análise estatística são apresentados na Figura 44, juntamente com aqueles dos dados brutos. A distribuição dos resíduos passou no teste de normalidade, podendo-se observar a notável diferença entre as duas distribuições.

Os semivariogramas omnidirecionais (Figura 45) apresentam estruturas gerais semelhantes, porém aquele dos resíduos mostra variância muito menor. Os resíduos de grau 3 passaram a ser considerados como a variável estacionária, já que os semivariogramas direcionais dos dados de menores ordens, apresentavam efeito-deriva.

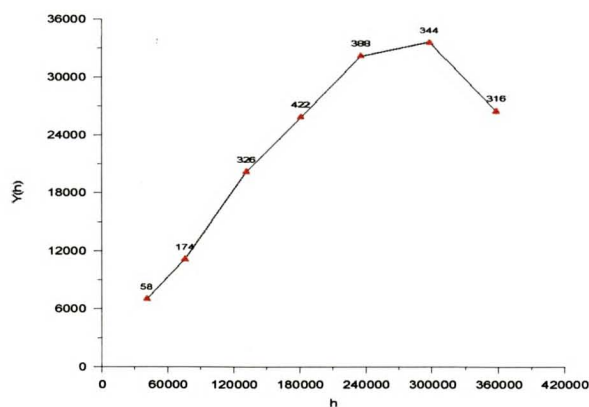


(A)

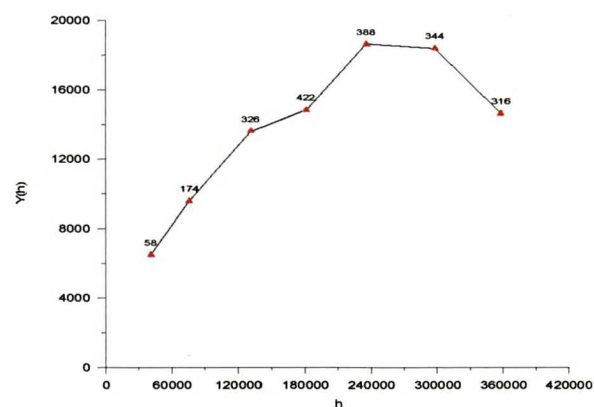


(B)

FIGURA 44 - Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).



(A)



(B)

FIGURA 45 - Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 3 (B) da STDM Superior. Os valores estabelecidos para os passos foram de 60 ± 60 km.

Algumas considerações foram feitas a partir da análise visual dos semivariogramas direcionais (Figura 46) :

- a) as maiores variabilidades encontram-se entre as direções EW e N60E, ao longo das quais devem ocorrer as maiores variações de espessuras;
- b) as maiores continuidades espaciais foram observadas em torno da direção N30W, cujo alcance atinge uma distância de 271 km. Ao longo desta direção prevê-se encontrar o menor número de estruturas com estas dimensões. Igualmente ao que foi verificado na sequência devoniana inferior, a direção que controlou em maior escala, a sedimentação e/ou erosão do pacote devoniano superior, parece estar localizada em torno do eixo N30W;
- c) verificou-se a nítida diferença de padrão estrutural entre os semivariogramas E-NE e os N-NW, acompanhada por uma acentuada discrepância entre os patamares. Esta falsa anisotropia zonal foi provocada pela retirada da superfície de tendência de 3ª ordem, cujo mapa mostra maior continuidade de valores ao longo da eixo norte-sul.

Os semivariogramas das direções N30W e N60E foram escolhidos para serem modelados, sendo apresentados na Figura 47. Observa-se um ajuste muito bom ao semivariograma N60E e uma maior dificuldade em adaptar o modelo à direção N60W. A explicação para este fato estaria ligada ao que já foi relatado logo acima, a respeito da retirada da tendência dos dados originais. Com este procedimento, a estruturação variográfica da direção N60W acabou ficando prejudicada. Mesmo assim, os resultados foram considerados satisfatórios para fins de krigagem.

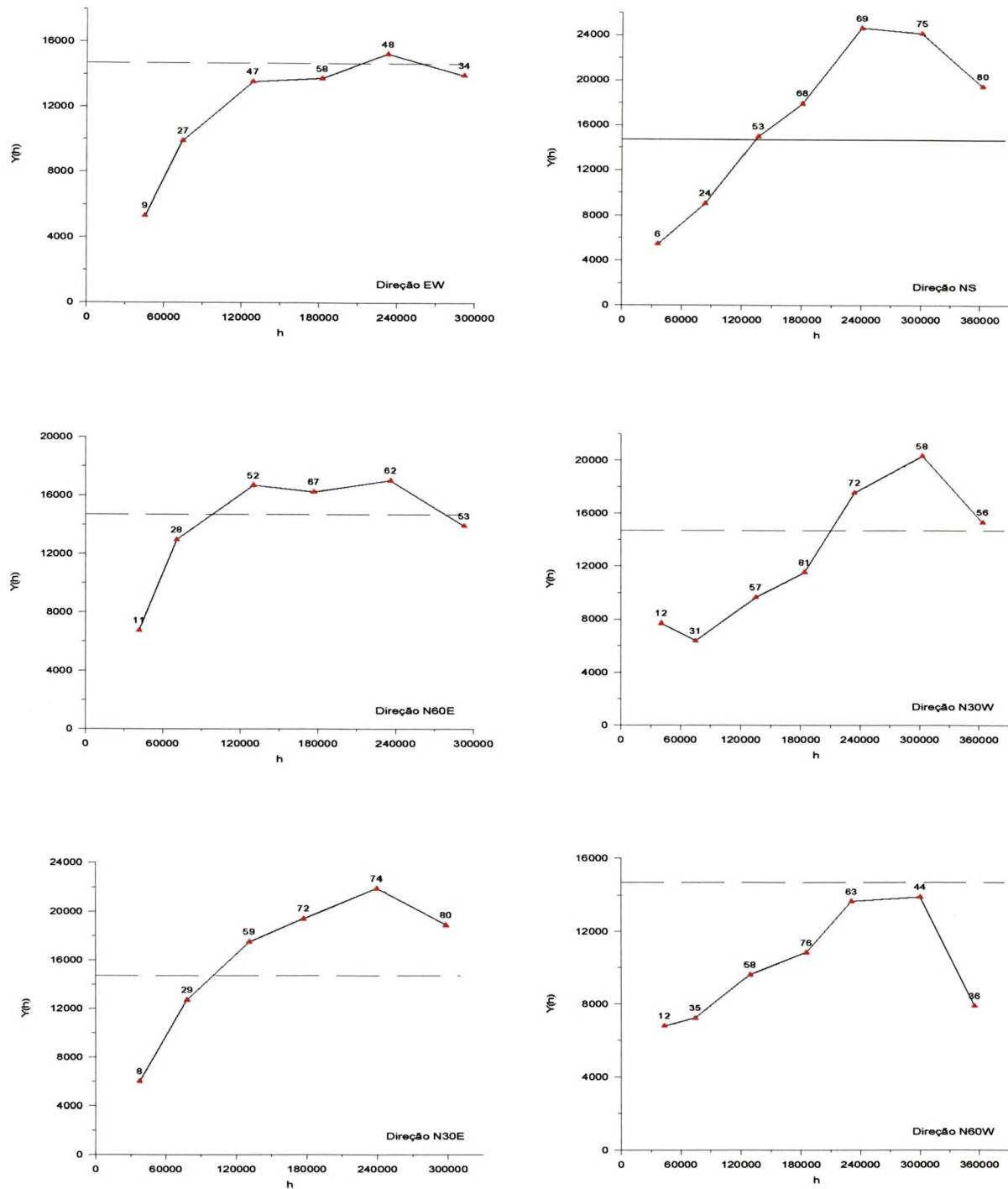
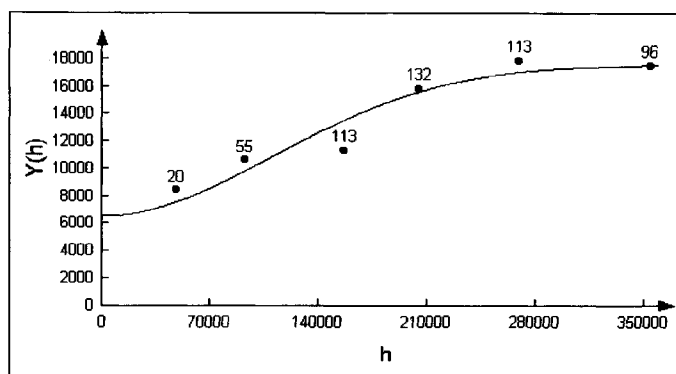
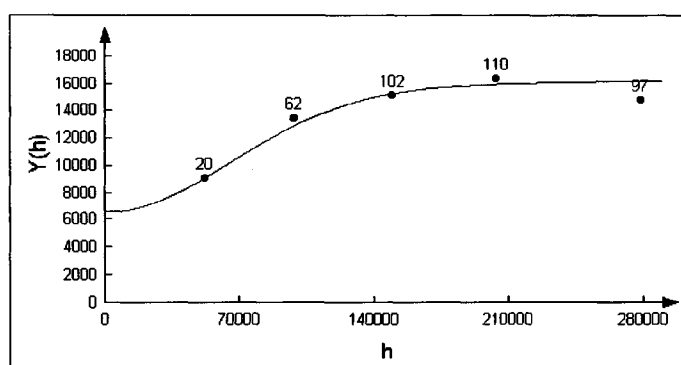


FIGURA 46 - Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3 da STD M Superior. Passos de 60 ± 60 km e tolerância angular de 30° .



(A)



(B)

FIGURA 47 - Modelo gaussiano ajustado aos semivariogramas da direção N30W (A) e N60E (B) para a STDM Superior. As dimensões adotadas para os passos foram de 70 ± 80 km e tolerância angular de 40° .

STPP INFERIOR

Foram utilizados na análise desta sequência os dados de resíduo de grau 2, cujos resultados estatísticos são apresentados na Figura 48. Nota-se na distribuição dos resíduos a ocorrência de duas sub-populações distintas, sendo a de valores negativos bem menos expressiva. A distribuição passou no teste de normalidade.

Os semivariogramas omnidirecionais (Figura 49) apresentam estruturas bastante distintas entre si; aquele construído a partir dos dados brutos mostra um nítido efeito-deriva até, pelo menos, a distância de 480 km. Já o semivariograma dos dados de resíduo atinge o

patamar numa distância de aproximadamente 240 km. Tal fato revela que um *trend* regional bastante significativo, foi retirado na análise de tendência. A variável resíduo passou a ser considerada nas demais etapas do estudo.

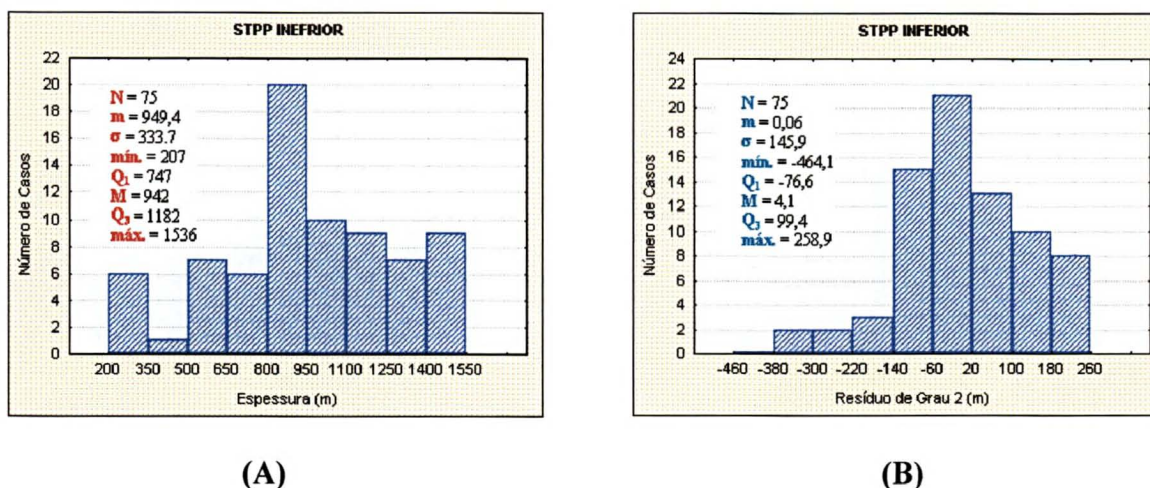


FIGURA 48 - Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 2 (B).

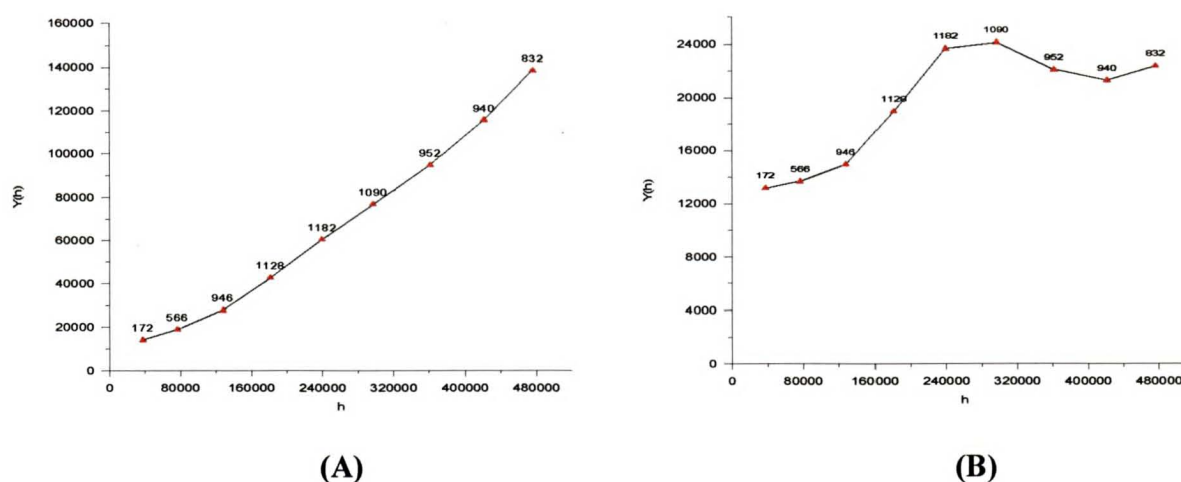


FIGURA 49 - Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 2 (B) da STPP Inferior. Os valores estabelecidos para os passos foram de 80 ± 80 km.

Com a análise dos semivariogramas direcionais obtidos (Figura 50), foram tiradas as seguintes conclusões :

- a) para as diferentes direções, as variações na continuidade espacial foram muito sutis, atingindo valores médios de alcance em torno de 270 km de distância. Esta característica sugere uma certa isotropia do ambiente;
- b) aparentemente, as maiores continuidades espaciais dispõem-se em torno da direção N30E, cujo alcance atinge uma distância de 300 km;
- c) a falsa anisotropia zonal também foi constatada nesta análise, estando os maiores patamares entre as direções EW e N60E; a feição foi provocada pela retirada da tendência de 2ª ordem;
- d) valores muito altos de efeito-pepita podem indicar a presença de micro-regionalizações, as quais teriam alcances inferiores a 90 km.

Foram modelados os semivariogramas N30E e N60W, aos quais foram ajustados o modelo gaussiano (Figura 51). Para ambos, os ajustes foram considerados muito bons ao longo de toda a estrutura variográfica, o que deu maior credibilidade aos resultados obtidos com a krigagem.

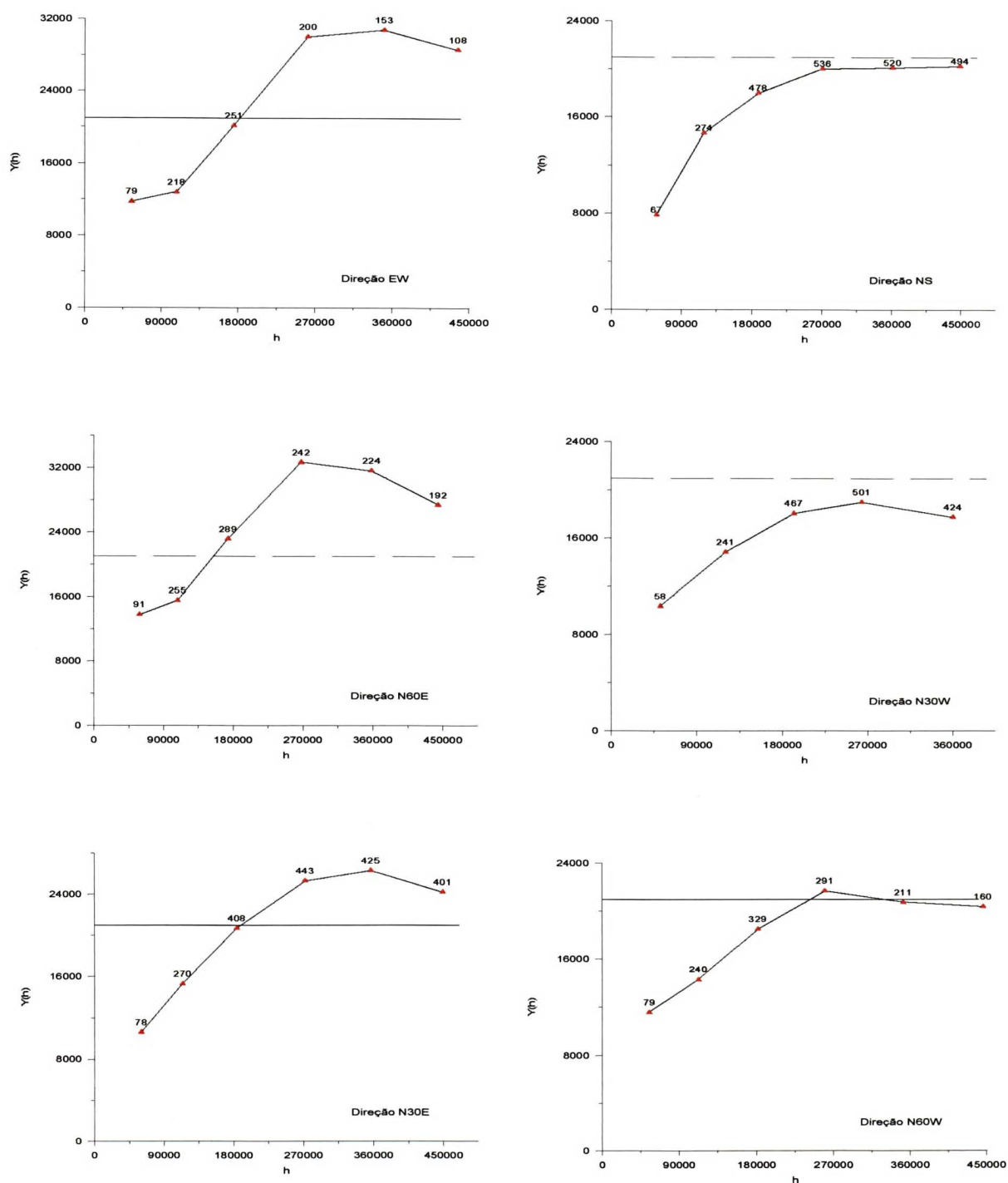
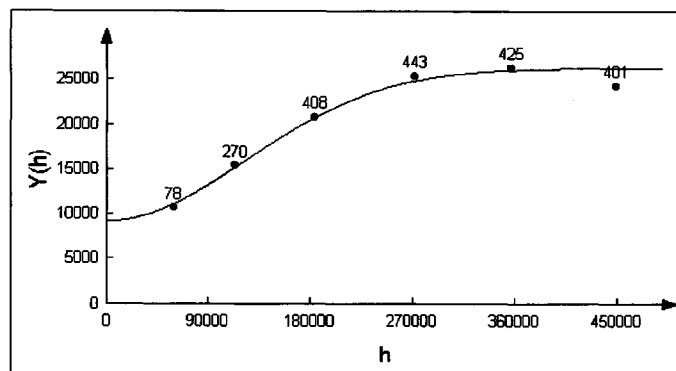
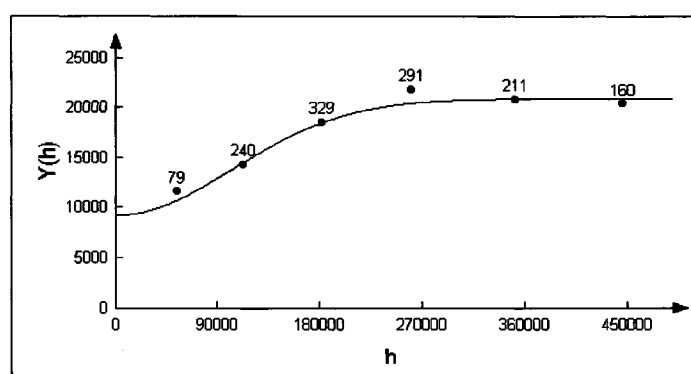


FIGURA 50 - Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 2 da STPP Inferior. Passos de 90 ± 90 km e tolerância angular de 40° .



(A)



(B)

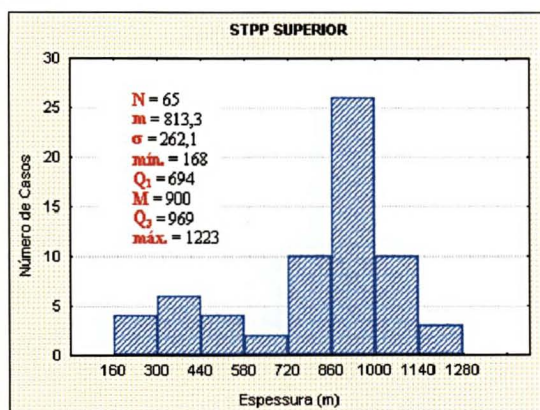
FIGURA 51 - Modelagem dos semivariogramas direcionais N30E (A) e N60W (B) para a STPP Inferior. Os passos apresentam dimensões de 90 ± 90 km.

STPP SUPERIOR

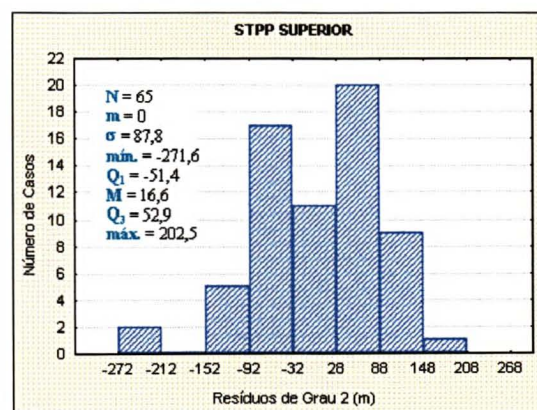
Foram utilizados os dados de resíduo de grau 2 durante o desenvolvimento da análise variográfica. Os parâmetros estatísticos obtidos são apresentados na Figura 52, juntamente com aqueles dos dados brutos. A distribuição dos resíduos passou no teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*; nota-se que as duas sub-populações encontradas no conjunto de dados brutos, já não mais aparecem no conjunto transformado.

Quanto aos semivariogramas omnidirecionais (Figura 53), observa-se que o obtido a partir dos dados brutos, mostra um pronunciado efeito-deriva até a distância aproximada de

400 km. O semivariograma dos dados de resíduo apresenta estrutura imbricada, com valores de alcance de aproximadamente, 160 e 320 km. Nesse caso, também fica revelada a retirada de um importante *trend* com amplitude regional.

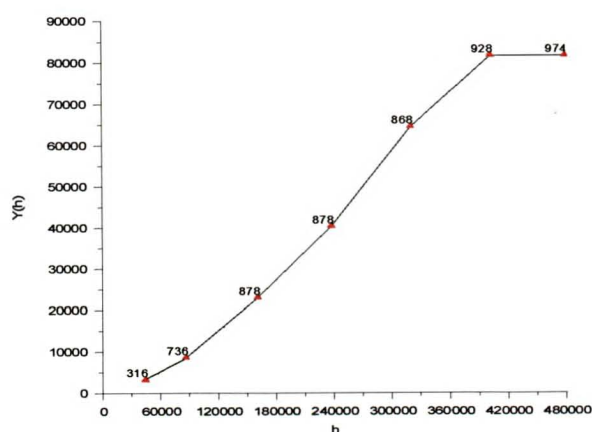


(A)

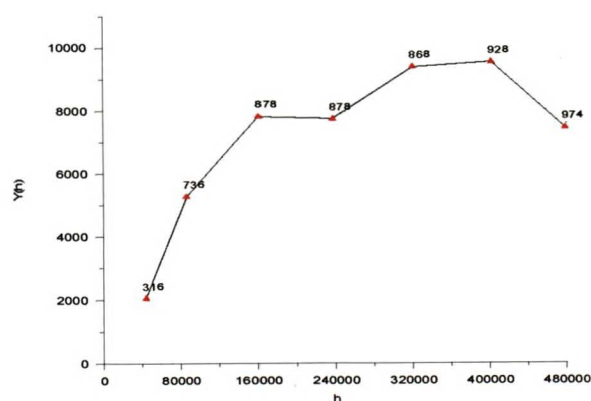


(B)

FIGURA 52 - Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 2 (B).



(A)



(B)

FIGURA 53 - Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 2 (B) da STPP Superior. Os passos são de 80 ± 80 km.

Com base na análise visual dos semivariogramas direcionais (Figura 54), foram verificadas as seguintes características :

- a) as maiores variabilidades são encontradas no quadrante noroeste, dentro do qual as direções analisadas apresentam alcances muito semelhantes entre si. Provavelmente, é ao longo da direção geral NW que se cruzam mais estruturas, com espaçamento médio de 120 km entre elas;
- b) também ficou difícil precisar a direção de maior continuidade espacial, mas certamente fica dentro do quadrante nordeste, indicando a existência de um controle NE da sedimentação e/ou erosão da sequência;
- c) em todos os semivariogramas, com exceção daquele na direção N60E, observou-se um marcante efeito-de-buraco a uma distância de 240 km, o que indica uma componente cíclica do fenômeno. Os valores de efeito-pepita são muito baixos, indicando grande continuidade do fenômeno a curtas distâncias.

Para a modelagem foram escolhidos os semivariogramas das direções N20E e N70W consideradas, respectivamente, as direções de maior e menor continuidade espacial. Ambos foram ajustados com a utilização de um modelo gaussiano (Figura 55). Os ajustes foram considerados satisfatórios para fins de krigagem.

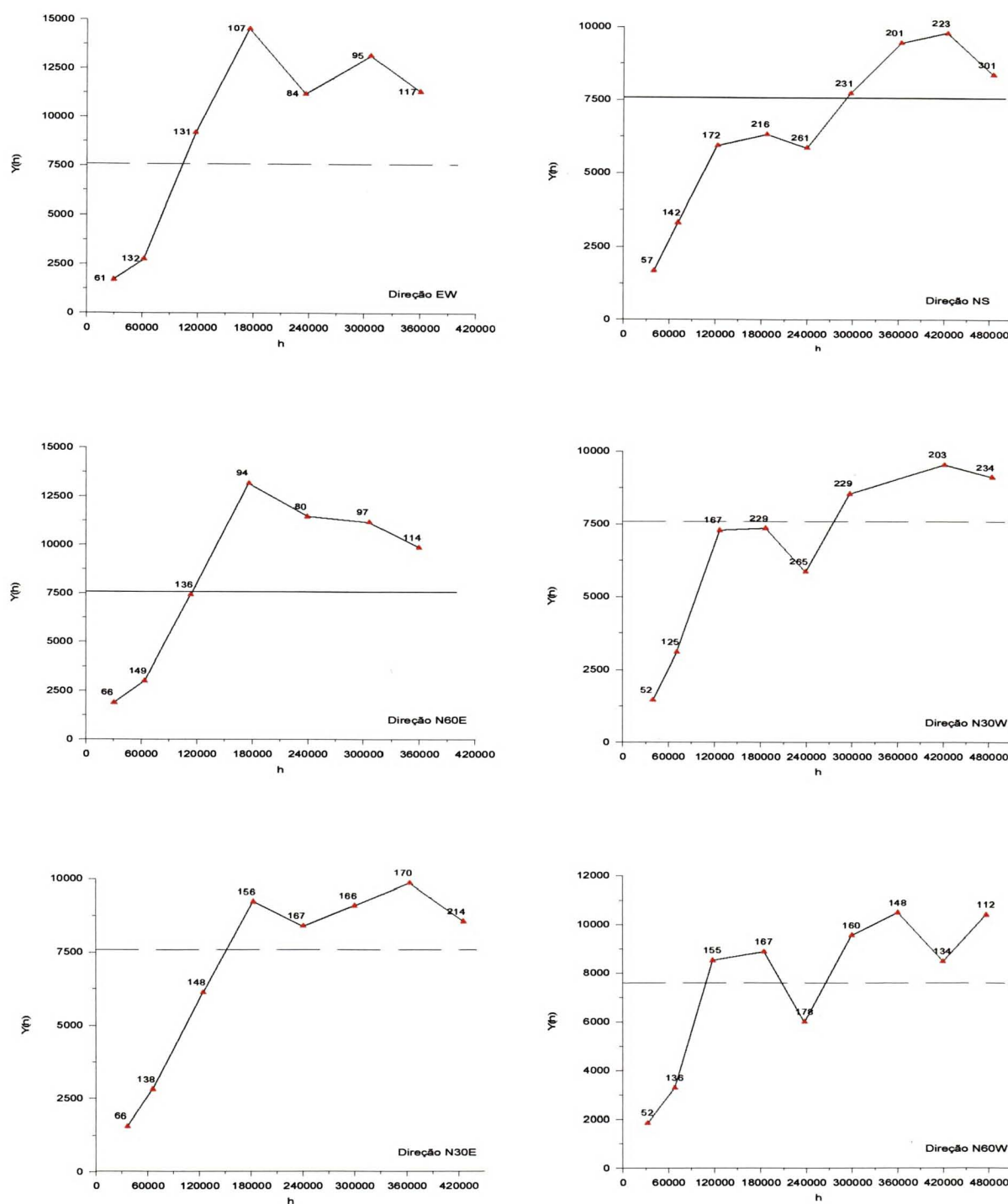
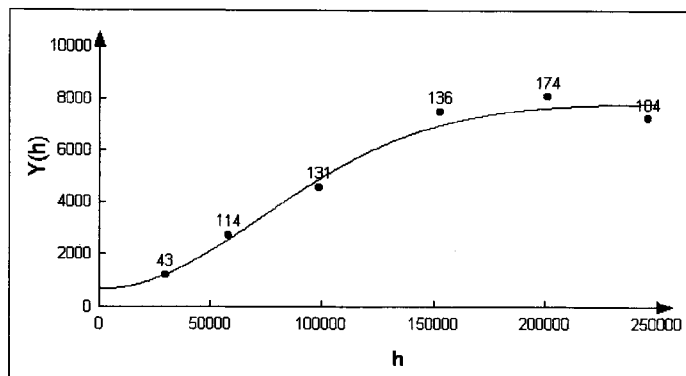
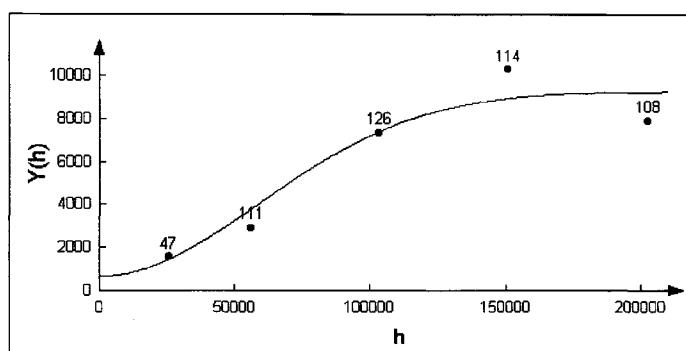


FIGURA 54 - Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 2 da STPP Superior. Passos de 60 ± 60 km e tolerância angular de 45° .



(A)



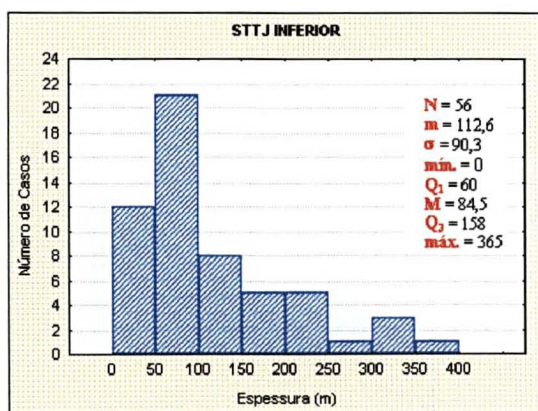
(B)

FIGURA 55 - Modelagem dos semivariogramas das direções N20E (A) e N70W (B) para a STPP Superior. Os passos são de 50 ± 50 km e a tolerância angular de 45° .

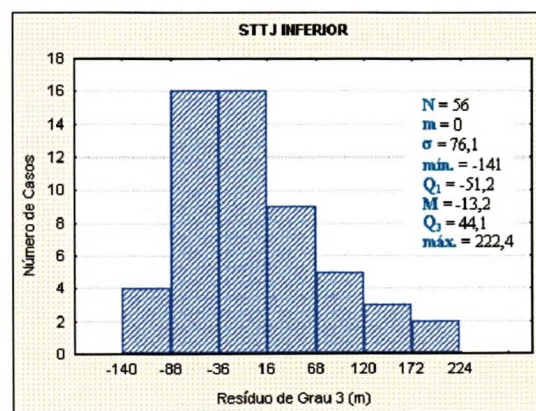
STTJ INFERIOR

Na análise desta sequência, os dados de resíduo de grau 3 foram adotados como a variável transformada estacionária; seus parâmetros estatísticos são apresentados na Figura 56. A distribuição passou no teste de normalidade, apesar de possuir uma assimetria positiva marcante, tal como nos dados brutos.

Nos semivariogramas omnidirecionais (Figura 57) observa-se no primeiro, um efeito-deriva progressivo além da distância de 500 km. Já o semivariograma dos dados de resíduo apresenta-se estável a partir da distância de 250 km.

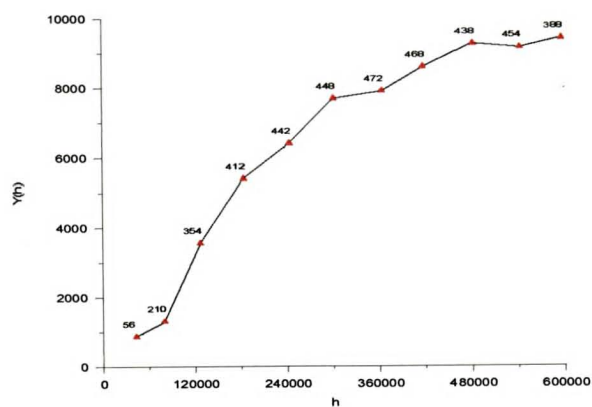


(A)

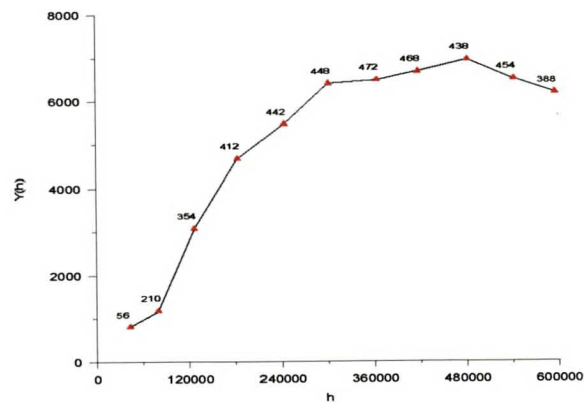


(B)

FIGURA 56 - Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).



(A)



(B)

FIGURA 57 - Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 3 (B) da STTJ Inferior. Os passos são de 60 ± 60 km.

Com a retirada deste *trend*, foram obtidos semivariogramas direcionais calculados a partir dos resíduos de grau 3 (Figura 58), sobre os quais pôde-se constatar algumas feições :

- a) as maiores variabilidades são encontradas em torno da direção N60W, ao longo da qual é atravessado o maior número de estruturas, com dimensões de até 180 km;
- b) já as maiores continuidades ficam contidas na faixa N30E-N30W;
- c) em todos os semivariogramas observam-se valores baixos de efeito-pepita, e portanto não sendo detectadas estruturas menores de 60 km;
- d) os altos valores nos patamares das direções EW e N60E são consequência natural da própria variabilidade espacial, que é maior ao longo destas direções.

Os resultados dos ajustes do modelo gaussiano aos semivariogramas das direções N15E e N75W (Figura 59), foram considerados bons somente a partir das distâncias de 150-180 km, o que para fins de mapeamento de estruturas de grande porte podem ser considerados como válidos.

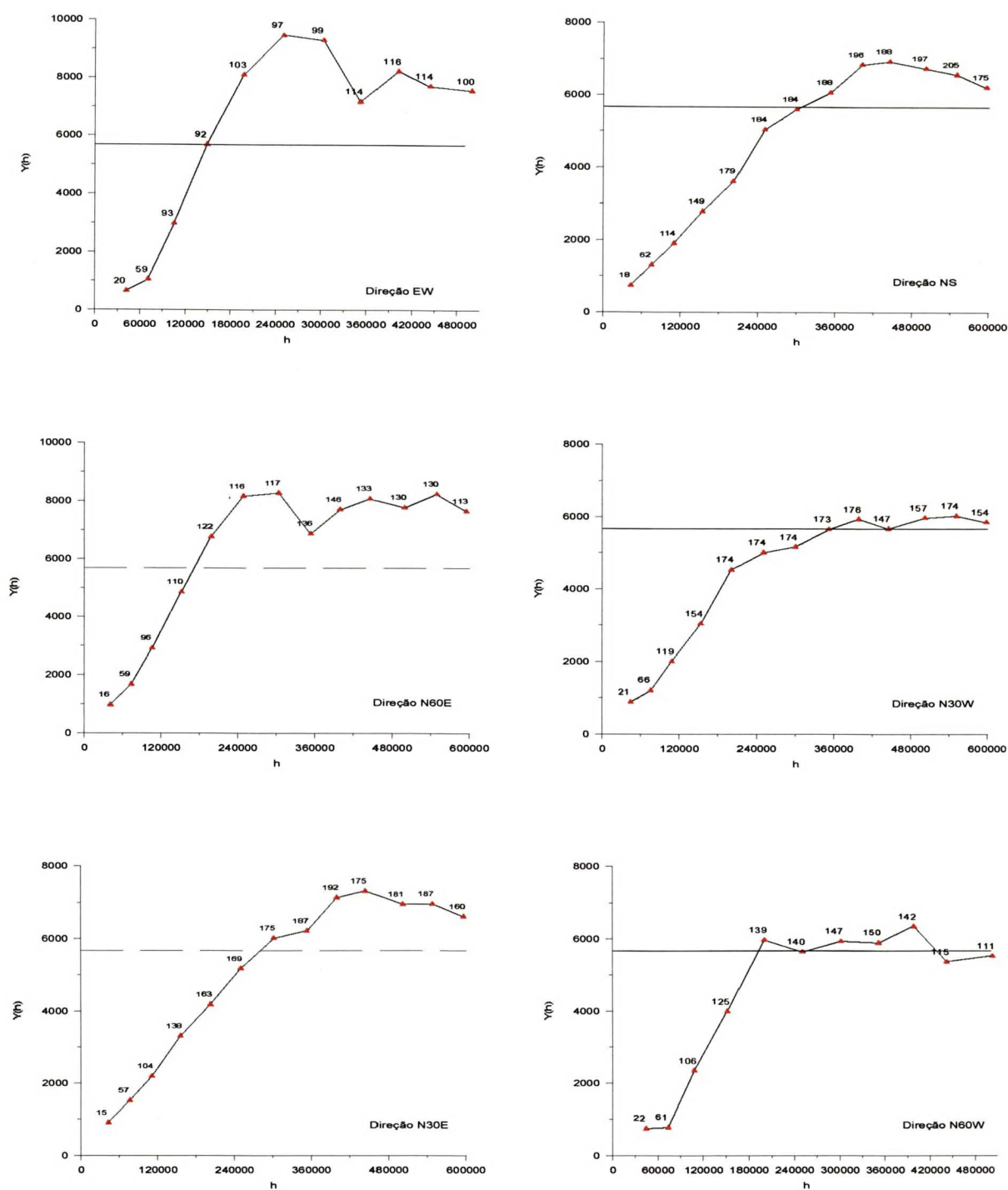
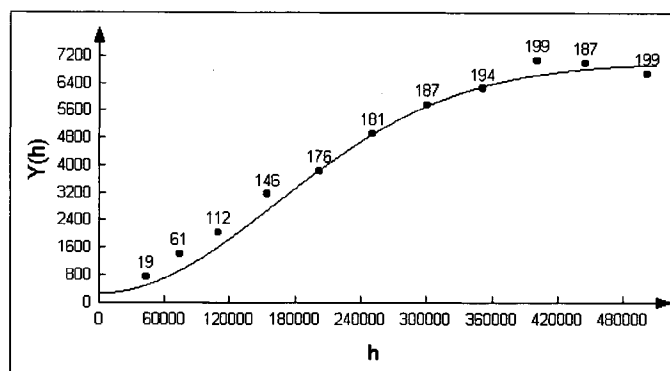
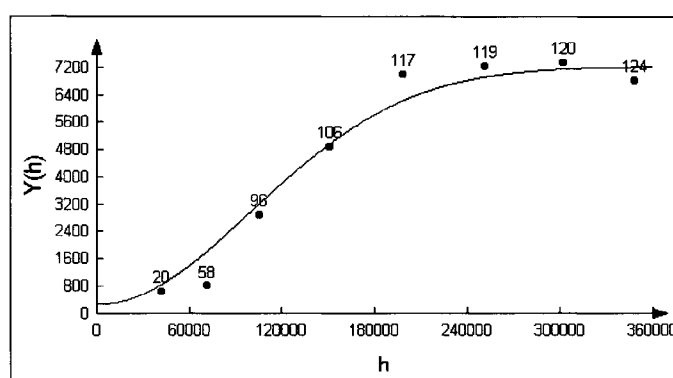


FIGURA 58 - Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3 da STTJ Inferior. Passos de 50 ± 60 km e tolerância angular de 60° .



(A)



(B)

FIGURA 59 - Modelagem dos semivariogramas das direções N75E (A) e N65W (B) para a STTJ Inferior. Os passos são de 50 ± 60 km e a tolerância angular de 60° .

INTRUSIVAS

Para a análise desta unidade foram utilizados os dados de resíduo de grau 3, sendo os resultados da estatística ilustrados na Figura 60. A distribuição obedece os requisitos de normalidade de *Shapiro-Wilk*.

Os semivariogramas omnidirecionais (Figura 61) apresentam estruturas bastante distintas, sendo que aquele obtido a partir dos dados brutos, mostra deriva acentuada até a distância aproximada de 420 km. Já o semivariograma dos resíduos estabiliza-se a partir da

distância de 220 km. Para os resíduos de 1ª e 2ª ordens os semivariogramas continuaram apresentando tendência de crescimento progressiva.

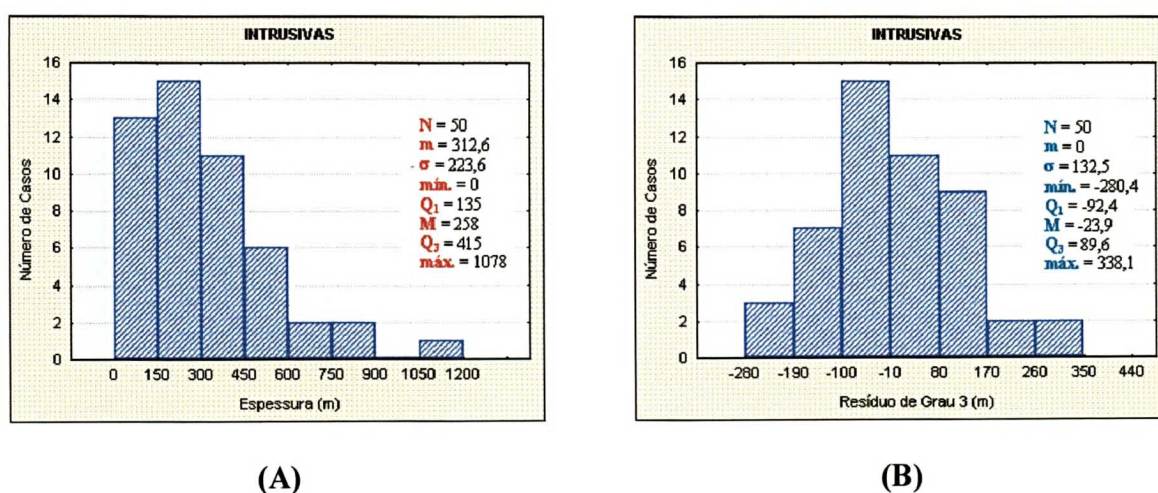


FIGURA 60 - Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).

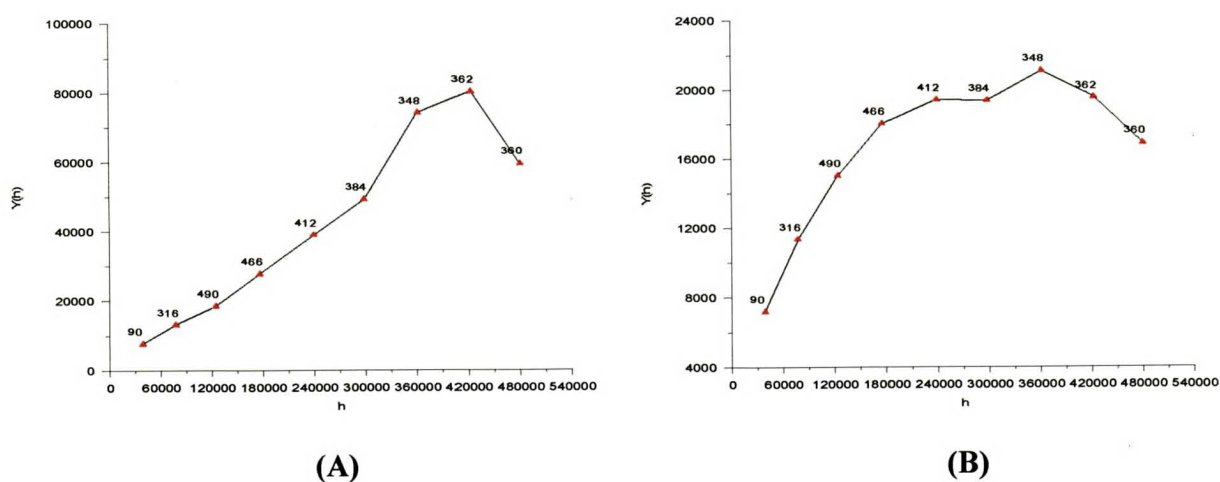


FIGURA 61 - Semivariogramas omnidirecionais dos dados de espessura (A) e de resíduos de grau 3 (B) das INTRUSIVAS. Os valores estabelecidos para os passos foram de 60 ± 60 km.

Algumas considerações foram feitas a partir da análise visual dos semivariogramas direcionais (Figura 62) :

- a) as maiores variabilidades são encontradas ao longo do eixo N30W-N60W, e as menores em torno do eixo NS-N30E. Provavelmente estas últimas sejam as direções controladoras do evento intrusivo concordante na bacia;
- b) possivelmente estruturas menores de 60 km estejam sendo atravessadas ao longo da direção N30E, isto sendo demonstrado pelo elevado valor de efeito-pepita.

Os semivariogramas das direções N15E e N75W foram escolhidos para serem modelados e são apresentados na Figura 63.

Os ajustes foram considerados bons desde as proximidades da origem, ficando nítida a maior continuidade espacial na direção N15E.

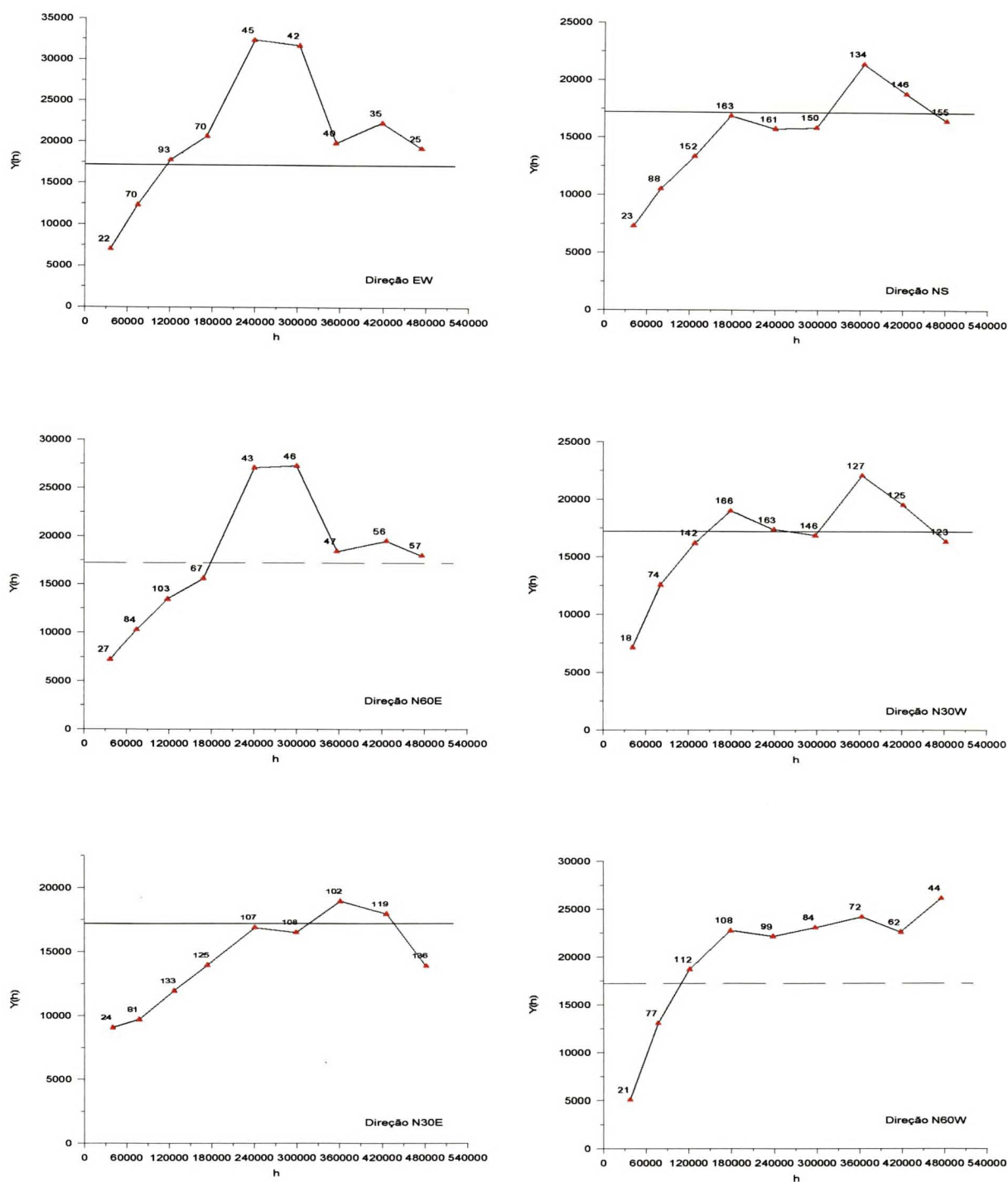
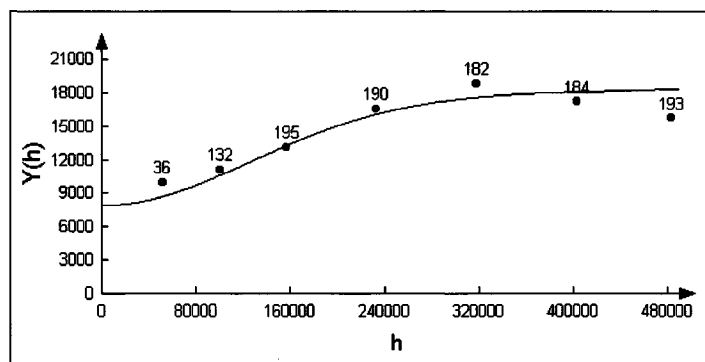
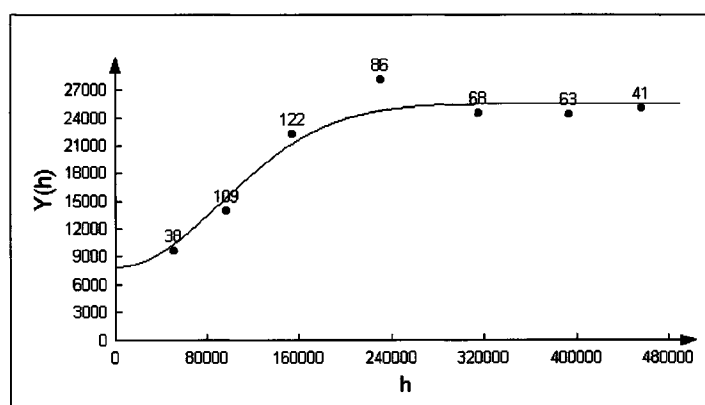


FIGURA 62 - Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3 das INTRUSIVAS. Passos de 60 ± 60 km e tolerância angular de 45° .



(A)



(B)

FIGURA 63 - Modelo gaussiano ajustado aos semivariogramas da direção N15E (A) e N75W (B) para as INTRUSIVAS. Os passos são de 80 ± 80 km e a tolerância angular de 45° .

4.3 ESTIMATIVA DE VALORES

As estimativas de valores dos dados de espessura foram desenvolvidas com a aplicação de um sistema de krigagem ordinária pontual. Considerou-se que a estimativa por blocos não seria adequada para este tipo de estudo, já que a intenção foi conhecer para um determinado ponto, o seu valor de espessura. Um detalhe importante é que a dimensão do suporte das amostras utilizadas (sondagens) é a mesma que a dimensão das estimativas obtidas, ou seja, pontual. Para os propósitos deste estudo, o erro de krigagem associado a cada valor estimado não foi considerado importante, já que o método de quantificação adotado não leva em consideração tal informação.

As janelas de trabalho oferecidas pelo SURFER são ilustradas de forma sequencial na Figura 64. Observa-se que na janela A introduz-se a variável regionalizada a ser utilizada nos cálculos, a geometria do *grid* e o método de interpolação; na janela B dá-se a entrada dos parâmetros variográficos obtidos nas modelagens e a razão de anisotropia e na janela C são fornecidos o tipo, as dimensões e as direções da elipse de pesquisa.

Na janela B verifica-se a possibilidade de introduzir parâmetros provindos da modelagem de semivariogramas com estrutura imbricada e com anisotropias zonal e geométrica. Tal prática foi bastante comum neste trabalho pois tais feições apareceram com muita frequência durante os estudos variográficos.

Na definição dos parâmetros da elipse de pesquisa procurou-se atribuir aos raios de maior e menor continuidade, valores iguais ou menores que os alcances obtidos nas modelagens dos semivariogramas. Porém, em alguns casos as distâncias adotadas foram maiores que os alcances, para permitir a estimativa de um número maior de valores, mas sempre tomando-se o cuidado para que os raios da elipse não apresentassem distâncias além dos valores situados no patamar, e ainda não abrangessem estruturas do tipo efeito-de-buraco.

Scattered Data Interpolation

Data Columns

X: Column A

Y: Column B

Z: Column C

Grid Line Geometry

	Minimum	Maximum	Spacing	# of Lines
X Direction:	40000	860000	20000	42
Y Direction:	6690000	8130000	20000	73

Gridding Method

Kriging

Output Grid File

C:\MEUS

Buttons: Data Info..., OK, Reset, Cancel, Options..., Search..., Browse...

A

Kriging Options

Variogram Model

	Type	Scale (C)	Length (A)	Anisotropy
Component 1:	Gaussian	990000	345000	Anisotropy
Component 2:	None	824000	831000	Anisotropy
Component 3:	None	824000	831000	Anisotropy

Nugget Effect

Error Variance: 0

Micro Variance: 0

Drift Type

☒ No Drift

☐ Linear Drift

☐ Quadratic Drift

Data Treatment

Duplicates: Delete

☐ Ignore Data Outside Grid

Buttons: Reset, OK, Cancel

B

Search Options

Search Type

☐ All Data

☐ Simple

☒ Quadrant

☐ Octant

Search Rules

Data Per Sector: 6

Minimum Total Data: 3

Max Empty Sectors: 1

Search Ellipse

Radius 1: 345000

Radius 2: 345000

Angle: 0

Buttons: Reset, OK, Cancel

C

FIGURA 64 - Sequência de procedimentos para uma estimativa por krigagem desenvolvida no Surfer 6.02. Comentários no texto.

Para a confecção dos *grids* adotou-se um espaçamento padrão de 15 km entre cada ponto estimado; este valor fica aquém dos alcances obtidos nas modelagens e também corresponde às dimensões das celas utilizadas na quantificação de favorabilidade. As áreas a serem mapeadas foram definidas de acordo com a distribuição dos dados de cada unidade estratigráfica, procurando-se não fazer estimativas muito além dos valores limítrofes de cada área.

Nas tabelas a seguir são apresentados os parâmetros variográficos adotados nas estimativas por krigagem. Os valores das direções de maior continuidade estão destacados em vermelho e os de menor, em azul.

Observa-se que em todos os casos foi necessário corrigir o fenômeno de anisotropia zonal, através da modelagem de duas componentes estruturais.

Para a unidade STDM Superior foram atribuídos valores para a elipse de busca, maiores que os alcances obtidos com as modelagens. Esta decisão, que é pouco recomendada, foi necessária para que um maior número de valores fossem calculados na estimativa por krigagem; no entanto, foram mantidas as proporções verificadas na razão de anisotropia.

TABELA 09 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STDM Inferior.

Unidade	Dir.	Modelo	N	S	R	Elipse Pesquisa
STDM-I	omnid.	gaussiano	1.430	1.500	367.000	Tipo : quadrante Dados por setor : 6 Mínimo total : 3 Máx. setores vazios : 1 R: 340 km

Dir.: direção analisada; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance

TABELA 10 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STDM Superior.

Unidade	Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
STDM-S	N30W e N60E	1 ^a	gauss.	6.600	9.270	271.000 160.000	1,69	Tipo : quadrante Dados por setor : 6 Mínimo total : 3 Máx. setores vazios : 1 R ₁ : 325 km/R ₂ : 190 km
		2 ^a	gauss.		1.800	271.000 1.000.000	6,25	

Dir.: direção analisada; Cp.: componente; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance; R.A.: razão de anisotropia

TABELA 11 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STPP Inferior.

Unidade	Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
STPP-I	N30E e N60W	1 ^a	gauss.	9.300	11.700	300.000 250.000	1,2	Tipo : quadrante Dados por setor : 6 Mínimo total : 4 Máx. setores vazios : 1 R ₁ : 300 km/R ₂ : 250 km
		2 ^a	gauss.		5.400	300.000 5.000.000	16	

Dir.: direção analisada; Cp.: componente; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance; R.A.: razão de anisotropia

TABELA 12 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STPP Superior.

Unidade	Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
STPP-S	N20E e N70W	1 ^a	gauss.	700	7.115	180.000 145.000	1,24	Tipo : quadrante Dados por setor : 6 Mínimo total : 3 Máx. setores vazios : 2 R ₁ : 180 km/R ₂ : 145 km
		2 ^a	gauss.		1.520	5.000.000 145.000	34,5	

Dir.: direção analisada; Cp.: componente; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance; R.A.: razão de anisotropia

TABELA 13 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais da STTJ Inferior.

Unidade	Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
STTJ-I	N15E e N75W	1 ^a	gauss.	2.880	6.700	400.000 247.000	1,62	Tipo : quadrante Dados por setor : 6 Mínimo total : 3 Máx. setores vazios : 1 R ₁ : 400 km/R ₂ : 247 km
		2 ^a	gauss.		280	5.000.000 247.000	20,2	

Dir.: direção analisada; Cp.: componente; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance; R.A.: razão de anisotropia

TABELA 14 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais das INTRUSIVAS.

Unidade	Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
INTRUS.	N15E e N75W	1 ^a	gauss.	8.000	9.900	310.000 225.000	1,38	Tipo : quadrante Dados por setor : 6 Mínimo total : 3 Máx. setores vazios : 1 R ₁ : 310 km/R ₂ : 225 km
		2 ^a	gauss.		7.800	5.000.000 225.000	22	

Dir.: direção analisada; Cp.: componente; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance; R.A.: razão de anisotropia

5 ANÁLISE DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS

O banco de dados gravimétricos utilizados nesta pesquisa compreende 19.676 valores de anomalia Bouguer, abrangendo toda a área da Bacia do Paraná e porções adjacentes (Figura 65-A). Esses dados foram submetidos às análises estatística, de tendência e geoestatística, além do emprego de técnicas de sombreamento de relevo.

No entanto, por motivos de limitação do *software* utilizado, não foi possível desenvolver a análise variográfica utilizando a totalidade dos dados do banco original. Com isso, foi utilizado o programa SELCASO, o qual é capaz de selecionar aleatoriamente o número desejado de dados, a partir dos originais. Foi então obtido um novo banco de dados contendo 1.005 medidas, que foi considerado representativo do original (Figura 65-B).

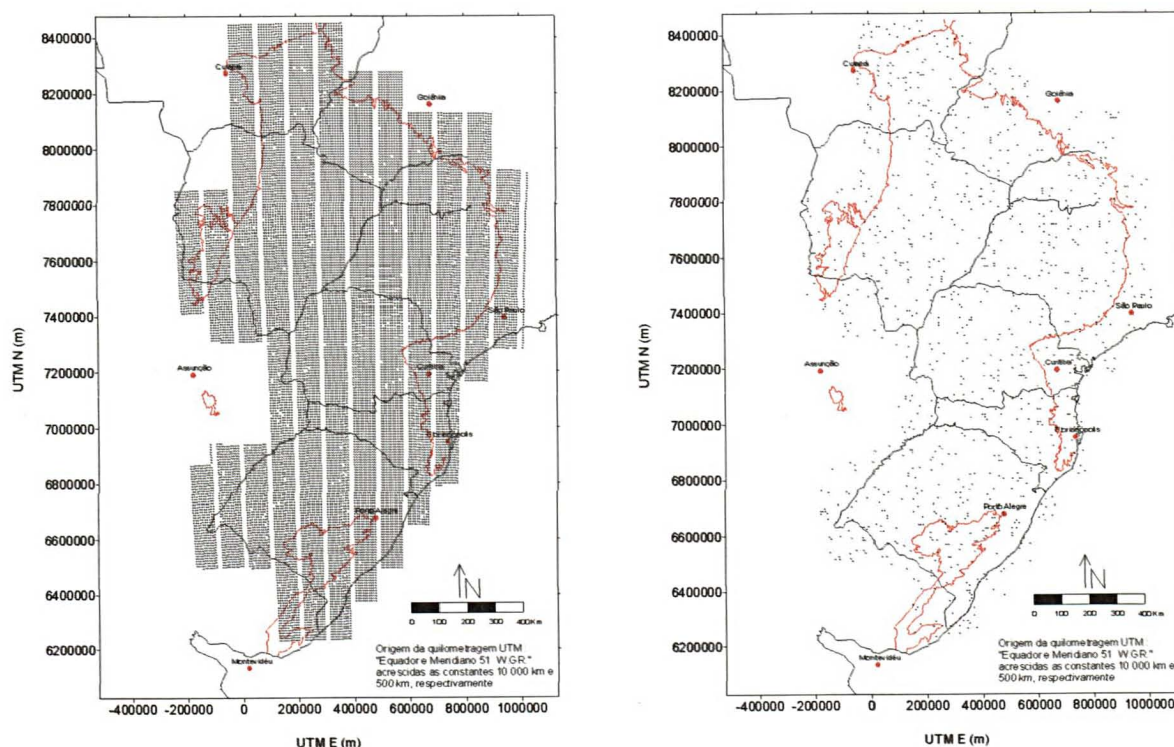


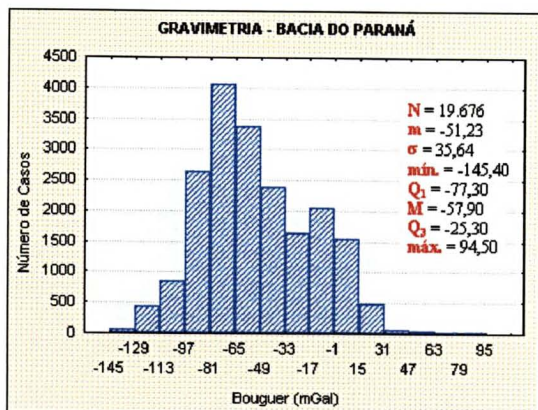
FIGURA 65 - A) Distribuição dos 19.676 dados gravimétricos originais. B) Distribuição dos 1.005 dados selecionados aleatoriamente.

Os dados utilizados neste trabalho já apresentam a correção Bouguer, uma técnica de correção de terreno bastante utilizada ao se manipular dados gravimétricos. Trata-se de um procedimento necessário a fim de compensar os possíveis efeitos de distorção dos valores observados, provocados pelas feições topográficas.

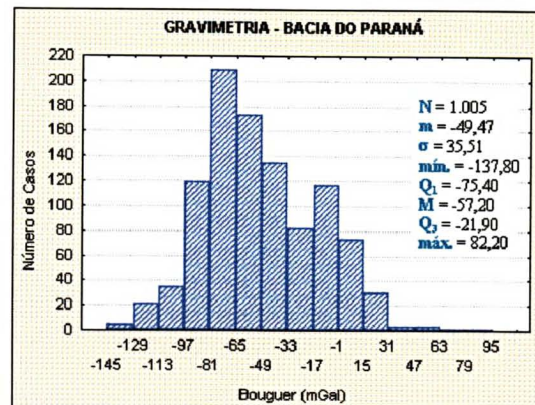
Os dados de anomalia Bouguer foram utilizados com o objetivo de mapear descontinuidades presentes no relevo gravimétrico da Bacia do Paraná. Para alguns autores, dentre os quais Mantovani et al. (1989) e Soares (1991), estas descontinuidades estariam relacionadas à presença de blocos litosféricos justapostos, com diferentes densidades. O resultado deste arranjo seria observado com o aparecimento de gradientes anômalos nos mapas de contorno, que poderiam ser interpretados como sendo faixas estruturais limitando os altos e baixos gravimétricos.

Porém, durante a interpretação geológica de dados gravimétricos, é muito importante ter em mente que os contornos observados nos mapas representam, por natureza, variações do campo gravitacional e não estruturas tectônicas. No entanto, as feições podem ser indicativas da presença de estruturas geológicas e são, comumente, interpretadas como tais. Dobrin e Savit (1988) recomendam que toda interpretação geológica desenvolvida a partir de resultados gravimétricos, deve ser balizada com o apoio de dados e informações independentes, tais como aqueles provindos de mapeamentos de superfície, perfis compostos ou seções sísmicas.

Após a definição dos limites do banco de dados utilizado nesta pesquisa, procedeu-se à análise estatística descritiva dos mesmos. Os resultados desta análise estão sumariados na Figura 66. Os dados de resíduos também foram analisados estatisticamente e os resultados são apresentados no capítulo 6.1.7.



(A)



(B)

FIGURA 66 - Histogramas de distribuição dos dados gravimétricos. (A) 19.676 dados e (B) 1.005 dados. N : número de casos; m : média aritmética; σ : desvio-padrão; **mín.** : valor mínimo; Q_1 : quartil inferior; M : mediana; Q_3 : quartil superior; **máx.** : valor máximo.

Pode-se constatar que a seleção aleatória de dados foi bastante eficiente, no tocante à preservação das características originais da população.

Observa-se que ambas as distribuições apresentam assimetria positiva e são nitidamente bimodais, estando as modas localizadas nas classes -81/-65 e -17/-1; tal fato caracteriza a presença de duas sub-populações com diferentes médias e desvios-padrões. Nota-se também que nos dois histogramas aparece uma cauda de valores positivos pouco representativos (*outliers*), que foram mantidos nos conjuntos por não comprometerem a qualidade da análise variográfica. Utilizando-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, os conjuntos mostraram-se não consistentes com a hipótese de distribuição normal. Ao que parece, cada uma das duas prováveis sub-populações que ocorrem em cada conjunto, apresentam distribuição normal.

5.1 TENDÊNCIAS REGIONAIS

Um procedimento bastante corriqueiro adotado durante a manipulação de dados gravimétricos, refere-se à separação das anomalias regionais e residuais. O termo *regional* é usualmente aplicado à componente da anomalia gravimétrica que apresenta o maior comprimento de onda, enquanto a componente que mostra uma fonte mais localizada e de menor comprimento de onda é denominada *residual* (Dobrin e Savit 1988). Métodos gráficos (visuais) e matemáticos costumam ser empregados para isolar os campos residuais associados às feições geológicas mais locais.

Neste trabalho, a técnica de análise de tendência foi empregada com o objetivo de caracterizar as anomalias de âmbito regional (grandes amplitudes e baixas frequências espaciais), possibilitando a retirada criteriosa das mesmas, a fim de que as anomalias supostamente associadas às estruturas geológicas locais pudessem ser analisadas isoladamente. Tal prática vem sendo comumente adotada nos estudos gravimétricos, pois sabe-se que gradientes regionais distorcem e mascaram os efeitos das feições estruturais locais. Na Figura 67 tem-se um exemplo de um perfil contendo os dois tipos de anomalias.

Em algumas áreas que apresentam grande extensão, costuma ser necessário o ajuste de superfícies de tendência com polinômios de elevado grau, caso o campo regional apresente muitas convoluções.

No presente trabalho o conjunto de 1005 dados foi submetido ao ajuste de superfícies de primeira à quarta ordem resultando, respectivamente, nos seguintes valores percentuais : 72,6 ; 83,4 ; 86,5 e 89,8. Nota-se o alto grau de explicabilidade apresentado desde a superfície planar e os pequenos incrementos a partir do ajuste de segunda ordem. Tais superfícies podem ser consideradas como a representação espacial de anomalias regionais, que apresentam

grandes amplitudes e baixas frequências. Os valores de ajuste das superfícies de tendência no conjunto de dados original não foram determinados, por limitação computacional.

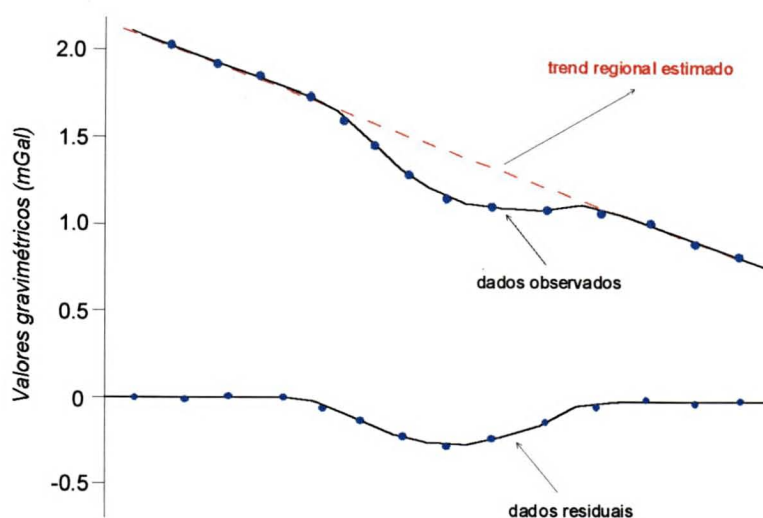


FIGURA 67 - Perfil gravimétrico mostrando a remoção de um *trend* regional ao longo de uma anomalia. (adaptado de Dobrin e Savit 1988).

Para analisar as particularidades associadas às estruturas lineares com pequeno comprimento de onda, foi efetuada a análise de tendência dos dados de anomalia Bouguer visando a obtenção dos resíduos. Primeiramente, foram gerados três mapas de tendência, de 1ª a 3ª ordem, os quais apresentaram ajustes elevados desde a superfície planar (Figura 68).

Nota-se a tendência geral em ocorrer baixos valores de anomalia Bouguer em direção ao quadrante nordeste; os menores valores encontram-se logo ao norte do estado de São Paulo. As superfícies de 2ª e 3ª ordem, que mostraram ajustes em torno de 85%, refletem a estruturação gravimétrica regional da bacia, apresentando direção NNE.

Juntamente com o reconhecimento e análise dos *trends* regionais, foram obtidos os resíduos dos dados gravimétricos, os quais passaram a ser considerados nos estudos geoestatísticos. Os resíduos dos bancos de dados original e selecionado, tiveram utilidade em

diferentes etapas do estudo; aqueles do primeiro conjunto foram utilizados na estimativa de valores por krigagem e os do segundo conjunto para a obtenção de parâmetros na análise variográfica.

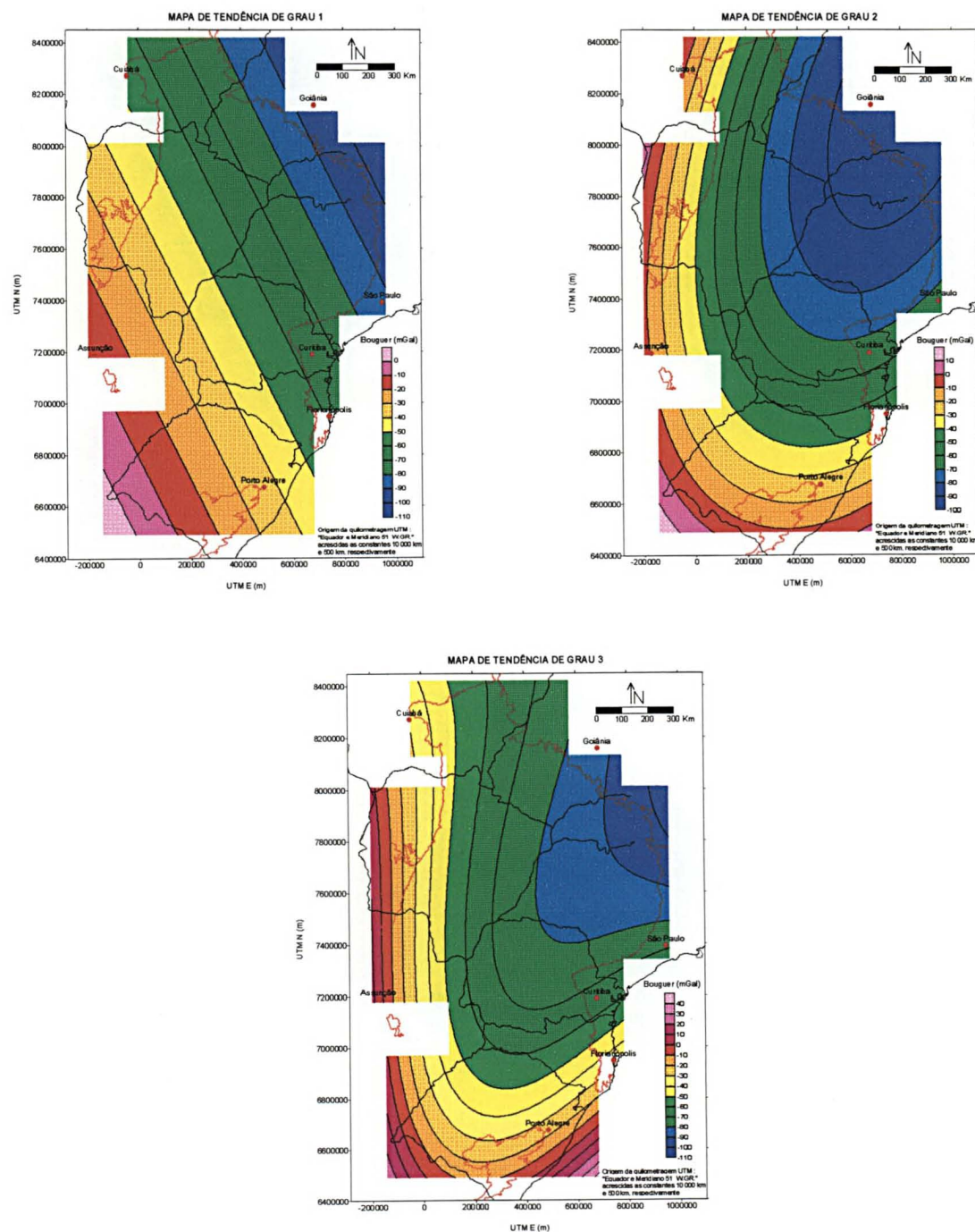


FIGURA 68 - Mapas de tendência de 1ª (72,6%), 2ª (83,4%) e 3ª ordem (86,5%) dos dados gravimétricos.

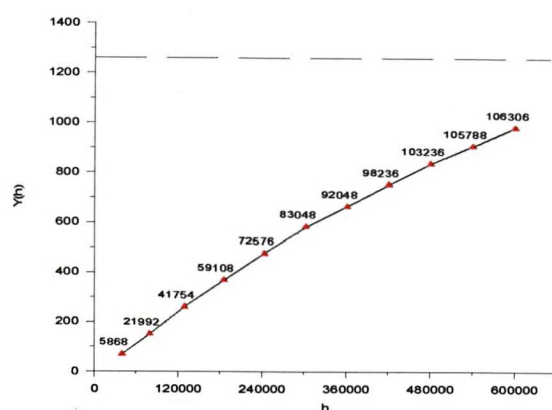
5.2 CONTINUIDADE ESPACIAL

Todas as etapas da análise variográfica foram desenvolvidas a partir do conjunto de 1005 dados selecionados, e a estimativa de valores por krigagem foi feita com a utilização de todo o conjunto original; considerou-se que os parâmetros variográficos obtidos representavam a realidade da população original e, portanto, poderiam ser aplicados.

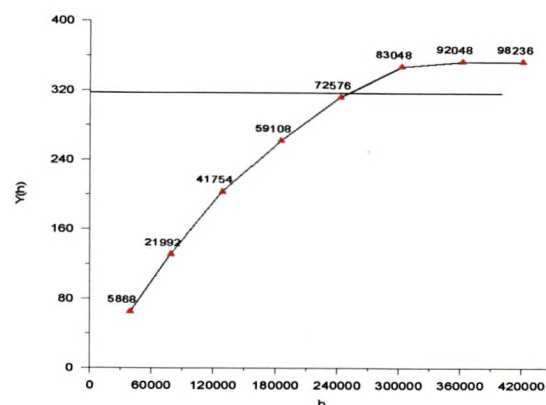
Constatou-se, já na construção dos primeiros semivariogramas omnidirecionais (Figura 69), que a variável bruta mostrava-se não estacionária, apresentando efeito-deriva bastante acentuado. Deste modo, passaram a ser analisados os resíduos obtidos com a análise de tendência, e verificou-se a validade da hipótese de estacionaridade nos semivariogramas construídos a partir do conjunto de valores de resíduos de 3ª ordem. Os semivariogramas dos resíduos de 1ª e 2ª ordens ainda mostravam suave deriva. Os parâmetros estatísticos dos dados brutos e de resíduos de 3ª ordem são apresentados na Figura 70.

Da mesma forma que o procedimento adotado com os dados de espessura, foram construídos além do semivariograma omnidirecional, mais seis direcionais (Figura 71), optando-se pela escolha de uma tolerância linear de 60 ± 60 km e tolerância angular de 30° .

Durante a determinação das direções de maior e menor continuidade espacial, notou-se a presença marcante do fenômeno de anisotropia zonal, e também que os alcances nas diferentes direções permaneceram praticamente os mesmos, variando entre 300 e 330 km de distância. Constatou-se que com a análise de tendência, grande parte da continuidade espacial na direção nordeste foi retirada, o que provocou a elevação dos patamares dos semivariogramas construídos ao longo desta direção.

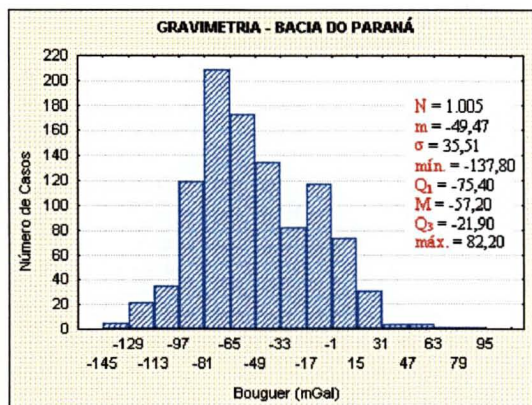


(A)

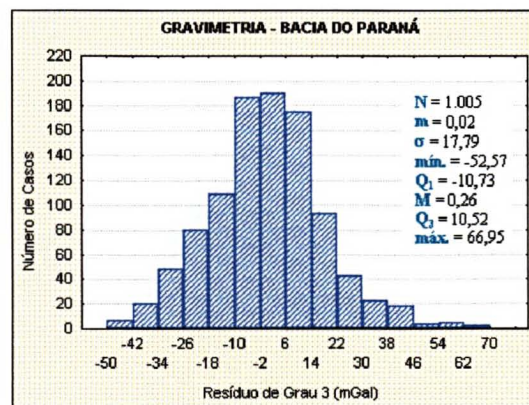


(B)

FIGURA 69 - Semivariogramas omnidirecionais dos dados brutos de anomalia Bouguer (A) e dos resíduos de grau 3 (B). Em ambos foram adotados passos de 60 ± 60 km.



(A)



(B)

FIGURA 70 - Histogramas dos dados brutos (A) e dos resíduos de grau 3 (B).

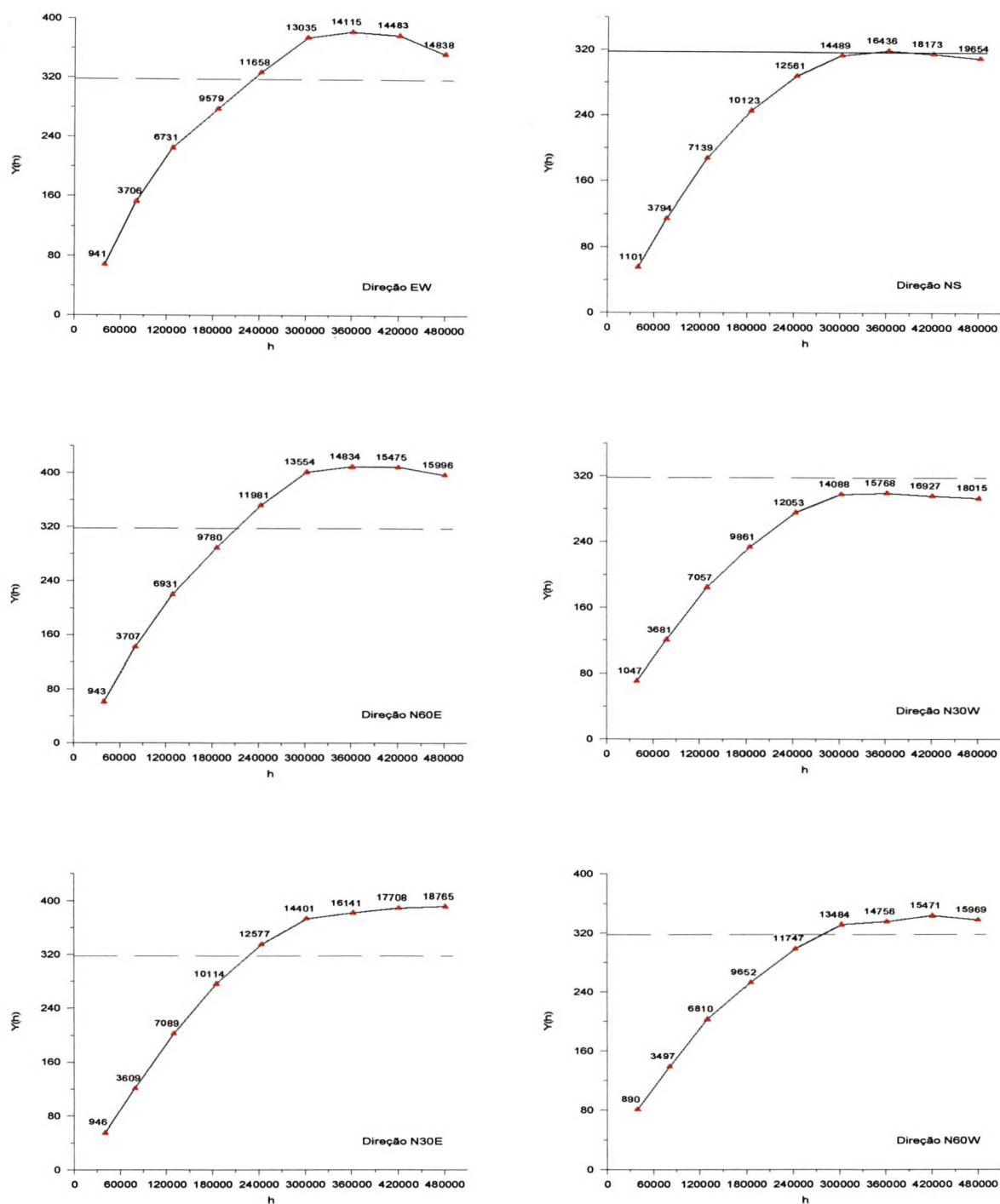
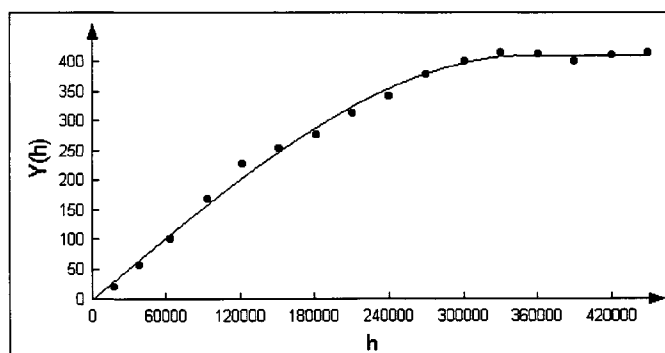


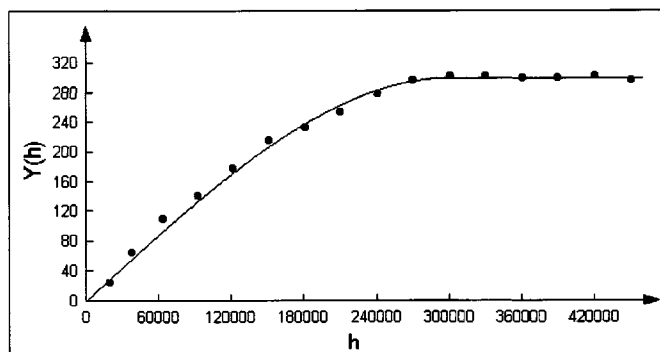
FIGURA 71 - Semivariogramas direcionais dos dados de resíduo de grau 3. Passos de 60 ± 60 km e tolerância angular de 30° .

Para a etapa de modelagem foi feita a escolha das direções N60E e N30W. Os semivariogramas mostraram-se muito bem estruturados, uma vez que a quantidade de dados utilizados foi muito grande. O modelo teórico de melhor ajuste foi o esférico (Figura 72). Os parâmetros variográficos são apresentados no capítulo seguinte.

Uma característica interessante observada, diz respeito à ausência de estruturas variográficas de pequeno porte. Foram feitas algumas tentativas, como a diminuição das distâncias de combinação entre os pares de amostras, com a intenção de identificar e modelar as pequenas estruturas. Alguns indícios de micro-estruturações foram observados, porém não foi possível individualizá-las e modelá-las, devido à ausência de estacionaridade à curtas distâncias.



(A)



(B)

FIGURA 72 - Modelagem dos semivariogramas das direções N60E (A) e N30W (B). Os passos são de 30 ± 30 km e a tolerância angular de 45° .

5.3 ESTIMATIVA DE VALORES

Os parâmetros obtidos na modelagem dos semivariogramas direcionais N60E e N30W foram utilizados nas estimativas de valores por krigagem. Como já relatado, tais valores provieram da análise efetuada sobre o conjunto de 1.005 dados de resíduos de 3ª ordem, porém as estimativas foram realizadas com a utilização de todo o conjunto original de dados (19.676), aplicando-se um sistema de krigagem ordinária pontual.

A elipse de pesquisa foi definida com dimensões de 2,5 vezes menores que os alcances obtidos nas modelagens, pois a quantidade de dados disponíveis para estimativa de cada valor era suficiente. Este procedimento também foi útil para evitar estimativas muito além dos dados limítrofes, já que os alcances apresentaram dimensões de algumas centenas de quilômetros.

Na etapa de geração dos *grids*, primeiramente foi confeccionado um mapa que cobrisse toda a área da Bacia do Paraná, apresentando espaçamento de 15 km entre cada valor de resíduo estimado. O mapa gravimétrico com valores brutos foi obtido adicionado-se a tendência, que havia sido retirada dos dados originais, aos valores de resíduos estimados. Posteriormente, utilizando-se os mesmos parâmetros, foram confeccionados os *grids* correspondentes à área de concentração dos estudos. Os parâmetros variográficos utilizados na krigagem são apresentados na Tabela 15.

TABELA 15 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais.

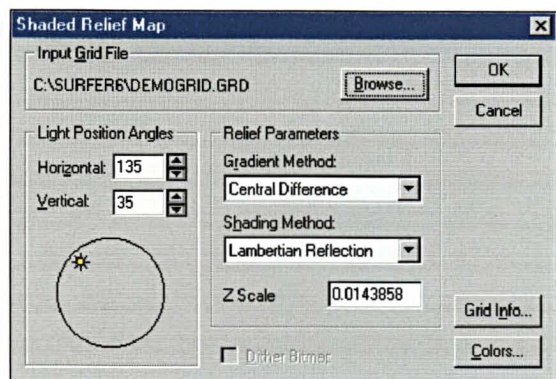
	Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
Anomalia Bouguer	N60E	1ª	esférico	0	301	351.000 300.400	1,17	Tipo : quadrante Dados por setor : 6 Mínimo total : 5
	N30W	2ª	esférico		111	351.000 5.000.000	15	Máx. setores vazios : 1 R ₁ : 140 km/R ₂ : 120 km

5.4 SOMBREAMENTO DO RELEVO GRAVIMÉTRICO

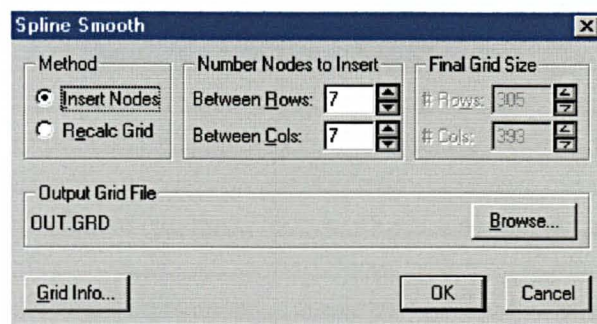
A técnica de sombreamento de relevo consiste em aplicar em um arquivo do tipo *grid*, uma iluminação artificial com direção e inclinação definidas pelo usuário, com o objetivo de destacar feições morfológicas do relevo analisado. Os mapas são gerados em formato *raster*, e a inclinação de uma superfície bem como sua direção são realçadas com a utilização de diferentes cores, normalmente por tons de cinza. Cada cela do mapa está associada a um valor percentual correspondente à taxa de luz que incide na superfície. Se por exemplo, uma cela apresentar valor 100% (totalmente branca), significa que naquele ponto os raios incidem perpendicularmente à face da superfície.

No presente trabalho, os mapas gravimétricos sombreados foram gerados no SURFER; a janela de trabalho é ilustrada na Figura 73. Um dos problemas encontrados durante a confecção dos mapas foi quanto às características geométricas do *grid* original. As celas apresentaram dimensões muito grandes e, inicialmente, os mapas gerados não trouxeram informações satisfatórias.

No entanto, um artifício que permitiu realçar as feições do relevo sombreado foi inserir novos valores entre as linhas e colunas do *grid*, a partir da utilização de uma ferramenta disponível no SURFER, denominada *spline smooth*; trata-se da aplicação do método de interpolação por convolução cúbica, no qual os valores originais do *grid* são utilizados para a estimativa de novos valores. Como resultado final foram obtidos mapas, nos quais os limites de cada nova cela tornaram-se praticamente imperceptíveis, proporcionando numa melhora bastante significativa na definição das feições estruturais. No capítulo 6.1.7 é apresentado um mapa sombreado, no qual destacam-se as estruturas com direção nordeste.



(A)



(B)

FIGURA 73 - Janelas de trabalho do SURFER que permitem : (A) aplicar o sombreamento de relevo e (B) redefinir a geometria de um *grid* com a inserção de novas células.

6 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os principais gráficos, mapas e tabelas gerados a partir das atividades descritas anteriormente, para cada produto sendo feita uma descrição objetiva das feições mais importantes.

Optou-se em subdividir o capítulo em três partes distintas, as quais serão relacionadas ao final do trabalho. A primeira traz os resultados diretamente relacionados à caracterização dos paleolineamentos, a partir das análises efetuadas sobre os dados de espessura e gravimétricos. Em algumas unidades foi possível realizar análise variográfica e estimativa por krigagem de micro-regionalizações, possibilitando a definição de estruturas de pequeno porte, não observadas nos mapas de estruturas mais regionais. Na segunda parte são apresentados os mapas contendo a delimitação de áreas com maior potencial de geração e proteção dos sistemas petrolíferos Ponta Grossa-Itararé e Irati-Rio Bonito/Tietê. Na terceira e última parte os lineamentos foram analisados quantitativamente, para definir quais as direções e tipos de estruturas favoreceram a ocorrência de acumulações de petróleo. Como resultado desta análise de favorabilidade parcial, foram obtidos dois mapas, um para cada sistema petrolífero, nos quais são identificadas áreas com maior possibilidade de ocorrerem prospectos, *com base nas variáveis lineamentos*.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DE PALEOLINEAMENTOS

O procedimento adotado para a caracterização de morfoestruturas, tanto nos mapas de contorno de iso-espessuras quanto no mapa de contorno do relevo gravimétrico, foi descrito no capítulo 3.5.

A caracterização geométrica destes elementos morfoestruturais foi, primeiramente, desenvolvida em toda a área ocupada pela Bacia do Paraná. No entanto, são apresentados

neste trabalho os lineamentos traçados sobre os mapas de contorno de resíduos, contidos somente na área de concentração dos estudos. A fim de diferenciar o tipo de morfoestrutura identificada nos mapas, foram utilizadas algumas simbologias, as quais são ilustradas na Figura 74.

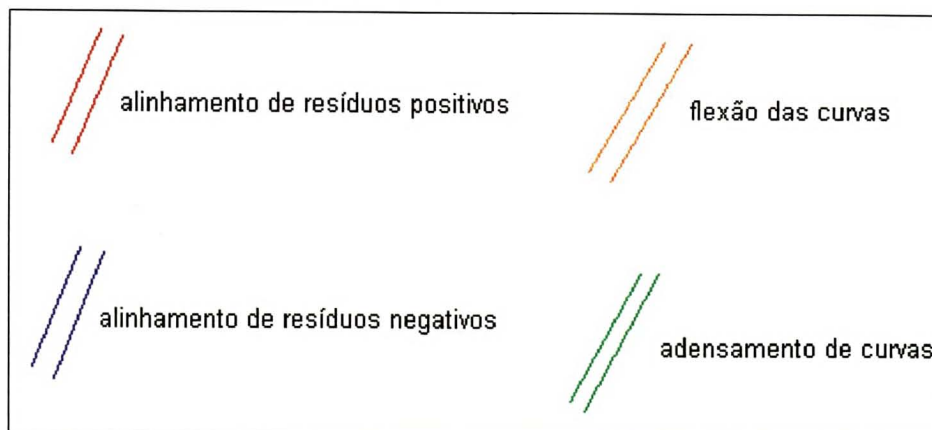


FIGURA 74 - Simbologia e significado dos lineamentos traçados sobre os mapas de contorno.

6.1.1 STDM INFERIOR

O mapa de contorno dos resíduos de 3ª ordem obtido pelo método da krigagem, é apresentado no mapa da Figura 75, onde destacam-se as seguintes feições :

- a) presença evidente de uma faixa com direção geral NE e, aproximadamente, 400 km de largura, constituindo um baixo local passando na região centro-nordeste do Mato Grosso do Sul e prolongando-se em direção ao estado de Goiás e também ao Paraguai;
- b) a constatação de uma borda na região noroeste da bacia, aproximadamente coincidente com os limites da borda atual, representando uma feição delimitadora da STDM Inferior durante a época da sedimentação; a própria definição dos

limites desta sequência (inferior discordante e superior concordante) permite considerar a feição como uma paleo-borda;

- c) a ocorrência de um *trend* regional NW passando pela região central do Paraná e sendo interceptada pela estrutura NE relatada em (a); esta estrutura noroeste coincide com a verificada no mapa de contorno obtido a partir dos dados brutos de espessura (este não é apresentado no trabalho).

A continuidade espacial dos resíduos a curtas distâncias também foi investigada, com o propósito de definir estruturas locais. Como a quantidade de dados pouco espaçados entre si é muito pequena, os semivariogramas direcionais não apresentaram boa definição. Com isso, decidiu-se pela análise variográfica omnidirecional, resultando no modelo apresentado na Figura 76. Apesar do número reduzido de pares por passo, o semivariograma apresenta boa estruturação e traduz um fenômeno de grande continuidade espacial à curtas distâncias. Os parâmetros variográficos utilizados na estimativa por krigagem são apresentados na Tabela 16.

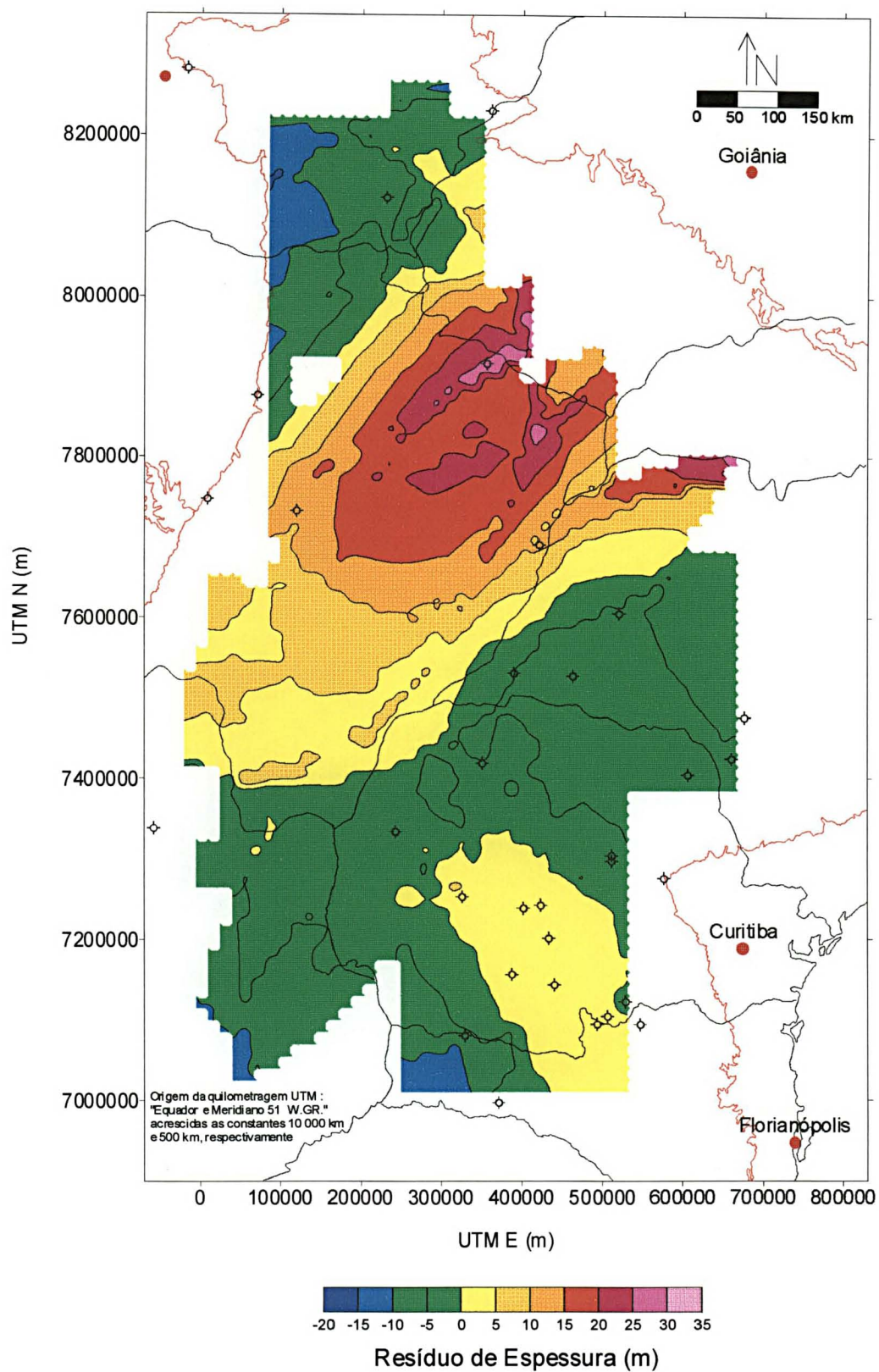


FIGURA 75 - Mapa de resíduos de 3ª ordem da STD M Inferior, refletindo estruturas de caráter regional.

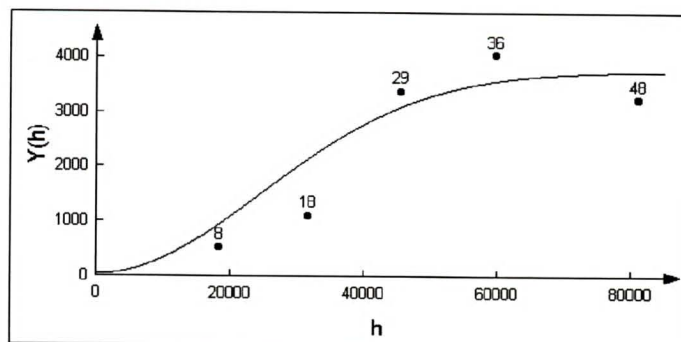


FIGURA 76 - Modelo gaussiano ajustado ao semivariograma omnidirecional da STDM Inferior.

TABELA 16 - Parâmetros utilizados na modelagem do semivariograma omnidirecional.

Unidade	Dir.	Modelo	N	S	R	Elipse Pesquisa
STDM-I	Omnid.	gauss.	45	3.735	60.000	Tipo : quadrante Dados por setor : 3 Mínimo total : 2 Máx. setores vazios : 2 R₁ : 90 km/R₂ : 90 km

Dir.: direção analisada; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance

A análise do mapa de resíduos, elaborado para identificar estruturas de pequeno porte (Figura 77), permitiu caracterizar algumas feições :

- nítido controle estrutural da sedimentação, com direção aproximada N45E, definindo uma faixa de valores de resíduo positivos (baixos estruturais), limitada por valores negativos a sudeste;
- truncamento da estruturação nordeste por uma faixa de valores negativos, alinhados na direção N45E, passando na região sudoeste de São Paulo; observa-se, apesar da falta de controle por poços, que parece ocorrer um inflexão da estruturação sinsedimentar NE para NW, na altura da região nordeste do Paraná.

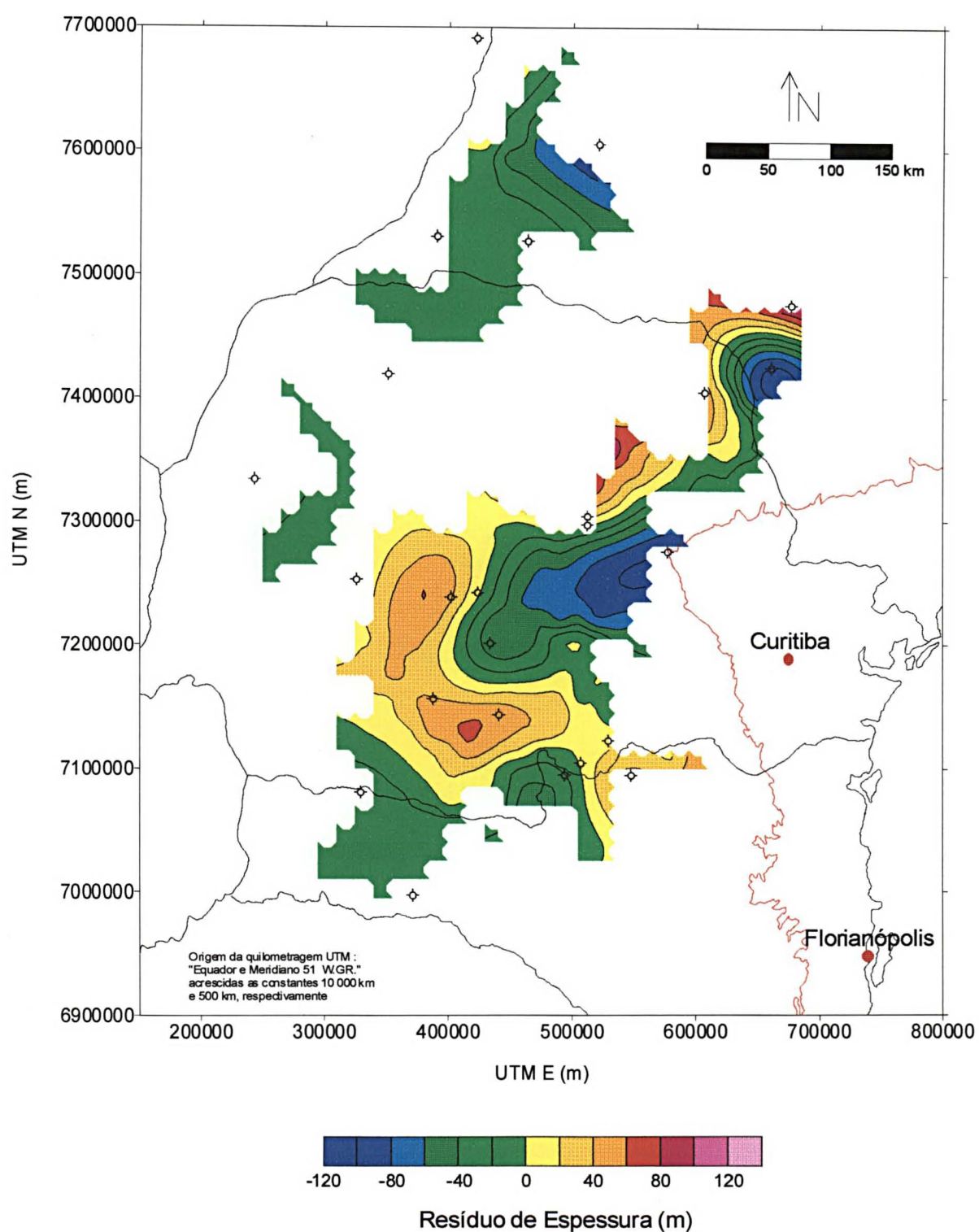


FIGURA 77 - Mapa de resíduos de 3ª ordem da STDm Inferior, evidenciando estruturas de caráter local, não presenciadas no mapa da Figura 75.

Vale ressaltar que as diferenças observadas entre os mapas das figuras 75 e 77, mesmo utilizando-se o mesmo conjunto de dados, são porque os cálculos são realizados a partir da utilização de diferentes ponderadores durante as estimativas de valores. Os cálculos desenvolvidos a partir de diferentes parâmetros variográficos naturalmente implicam na obtenção de diferentes mapas. Isto também ocorre quando são ajustadas superfícies de tendência de diferentes ordens, a um mesmo conjunto de dados : os mapas resultantes são totalmente diferentes entre si, pois os ponderadores utilizados são diferentes.

Após a confecção dos dois mapas de distribuição dos resíduos, foram traçados os elementos morfoestruturais com base no arranjo geométrico das curvas, os quais são apresentados nas Figuras 78 e 79. Foram observadas as seguintes características na área de estudo :

- a) no mapa das estruturas regionais (Figura 78) poucas foram as estruturas identificadas; a caracterização foi considerada frágil, devido à pequena quantidade de valores disponíveis e às grandes distâncias que os separam;
- b) as estruturas de caráter mais local tornam-se bastante evidentes no mapa da Figura 79. Observa-se na região centro-sul do Paraná, altos e baixos estruturais alinhados na direção NE, aparentemente truncando estruturas mais antigas NNW;
- c) as diversas faixas de variação anômala de espessuras podem ser o registro da atuação de processos de falhamentos (NE e NW), atuantes durante a deposição dos sedimentos devonianos.

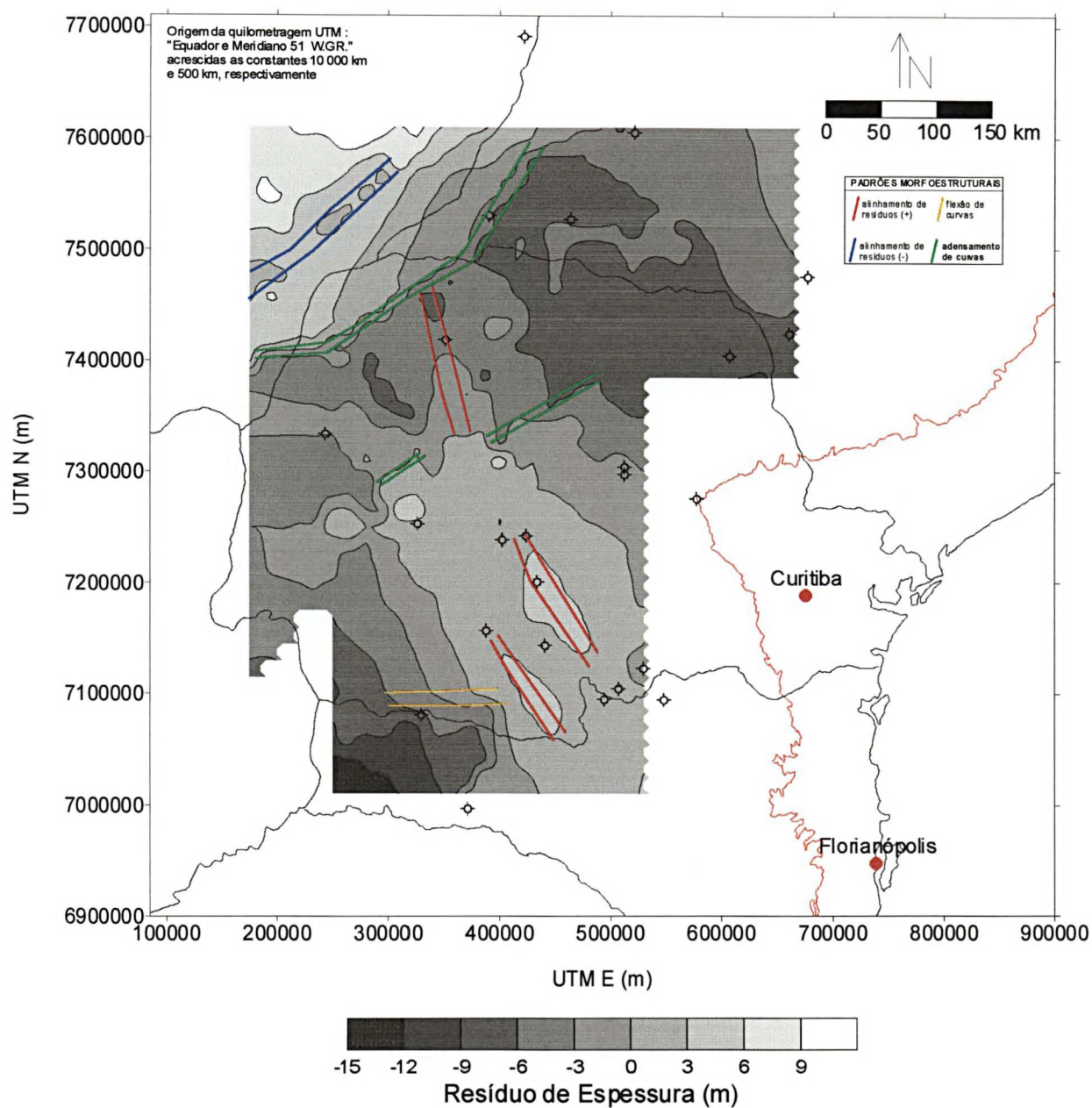


FIGURA 78 - Paleo-estruturas regionais traçadas sobre mapa de resíduos de 3ª ordem da STDm Inferior.

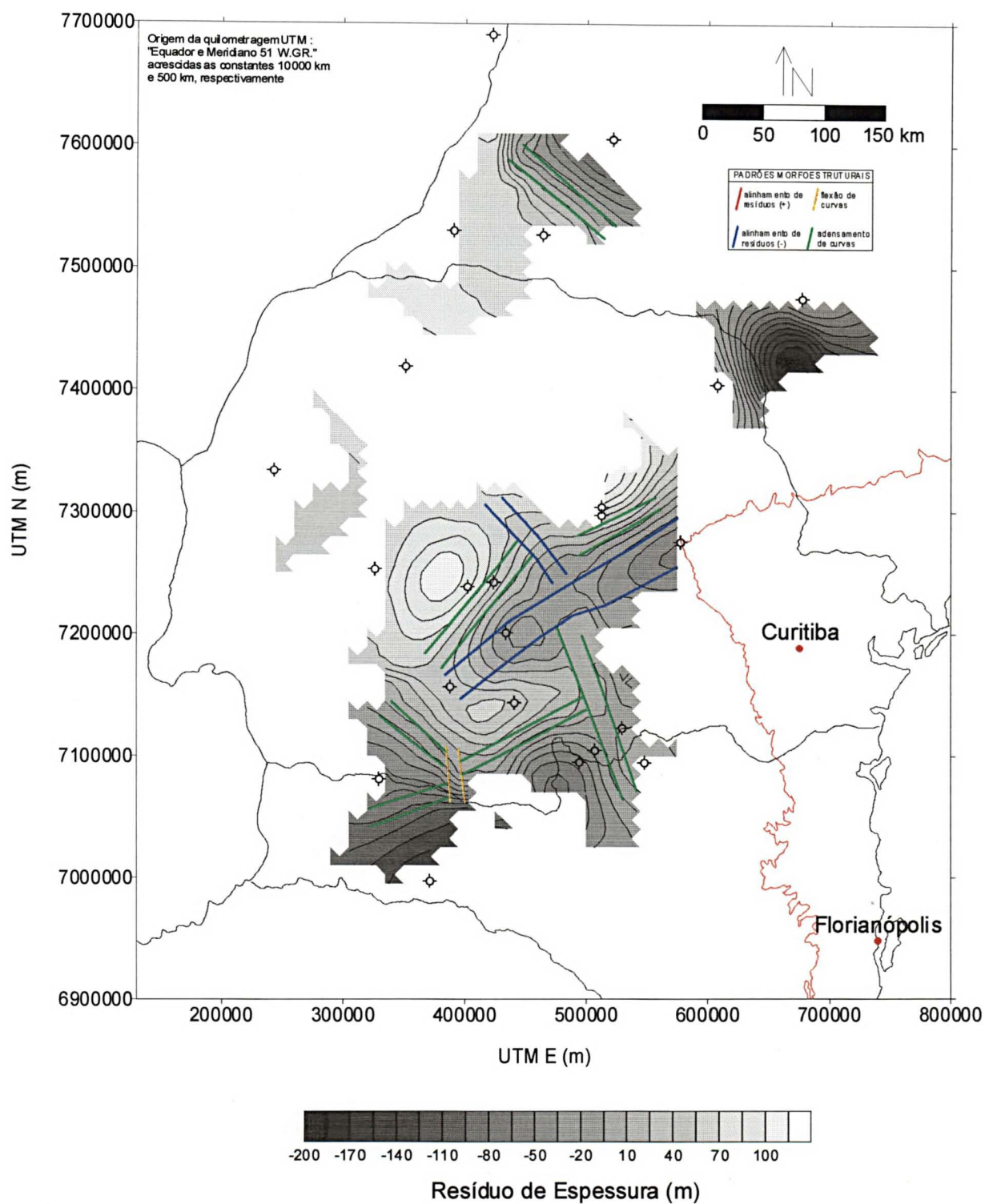


FIGURA 79 - Paleo-estruturas locais traçadas sobre mapa de resíduos de 3ª ordem da STDm Inferior.

6.1.2 STDM SUPERIOR

No mapa da Figura 80 são observadas as estruturas regionais mapeadas sobre o contorno dos resíduos de 3ª ordem. As principais feições constatadas foram as seguintes :

- a) forte controle regional NW marcado por duas faixas de valores positivos (baixos) justapostas por uma faixa de valores negativos (alto);
- b) a faixa de altos valores de resíduo situada mais ao sul mostra-se, a grosso modo, posicionada ao longo da direção NW, na região ocupada pelo Arco de Ponta Grossa.

Nesta sequência foi possível avaliar a continuidade espacial dos resíduos a curtas distâncias aplicando-se a análise variográfica direcional. As direções escolhidas foram a N60E e N30W, respectivamente a com maior e menor continuidade. Os modelos ajustados a estes semivariogramas são apresentados na Figura 81; nota-se a pequena quantidade de pares em cada passo e a marcante anisotropia zonal. Os parâmetros variográficos estão listados na Tabela 17.

O mapa de resíduos gerado (Figura 82) mostra uma estrutura com direção aproximada N40E, provindo do sudoeste do Paraná, coincidente com aquela verificada na sequência inferior. A estrutura é bruscamente interrompida por um núcleo de valores positivos, posicionado na região central do Paraná.

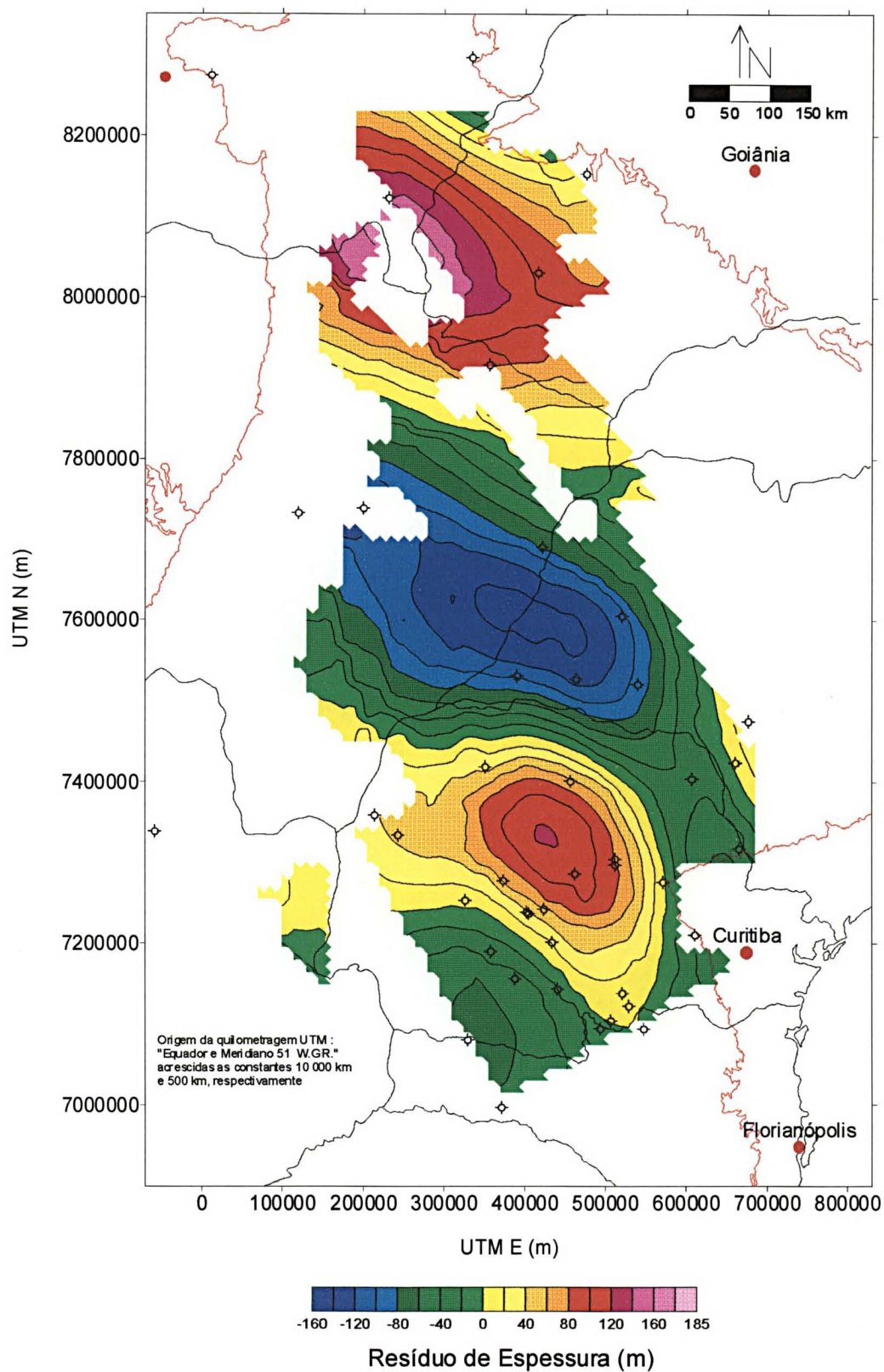
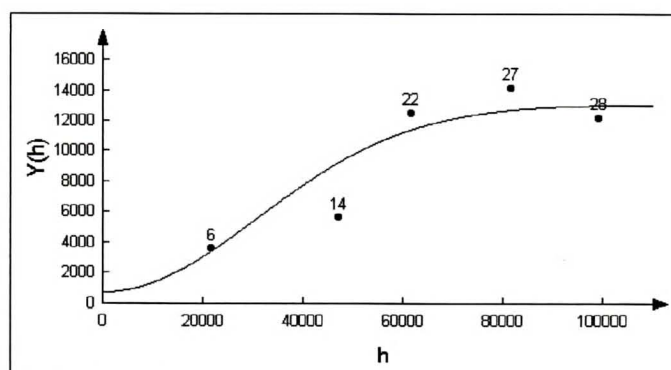
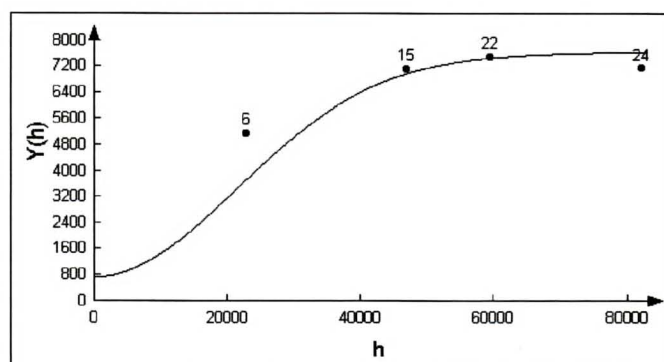


FIGURA 80 - Mapa dos resíduos de 3^a ordem da STD^M Superior, refletindo estruturas regionais alinhadas, preferencialmente, na direção noroeste.



(A)



(B)

FIGURA 81 - Modelos ajustados aos semivariogramas direcionais da STDN Superior : (A) N60E e (B) N30W. Os passos são de 20 ± 20 km e a tolerância angular é de 60° .

TABELA 17 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais.

Unidade	Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
STDN-S	N60E	1 ^a	gauss.	750	6.800	75.500	1,45	Tipo : quadrante
	N30W	2 ^a	gauss.			52.000		Dados por setor : 6
						75.500		Mínimo total : 2
					5.600	1.000.000	13	Máx. setores vazios : 2
								R ₁ : 90,6km/R ₂ : 62,4km

Dir.: direção analisada; Cp.: componente; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance; R.A.: razão de anisotropia

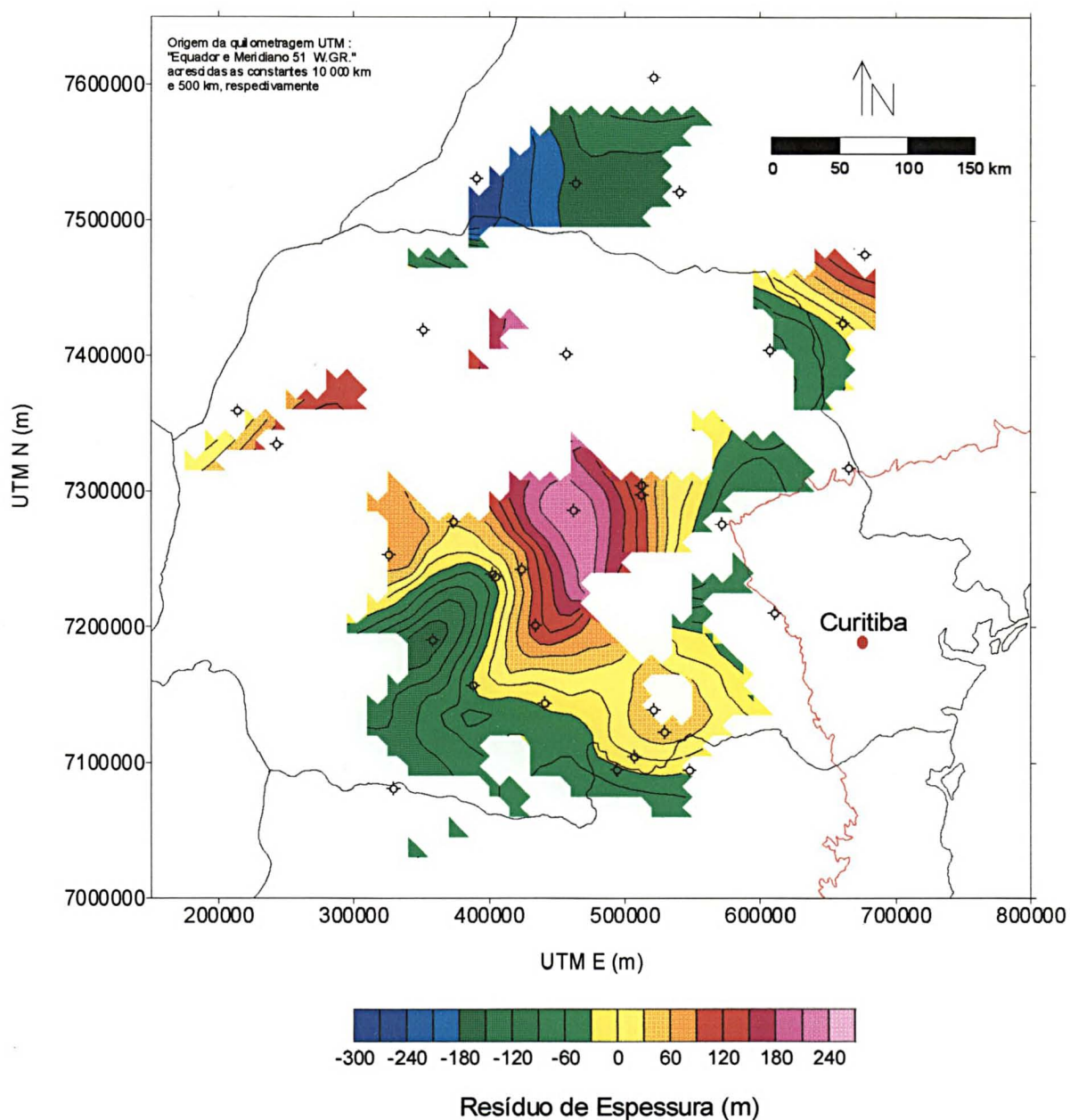


FIGURA 82 - Mapa dos resíduos de 3ª ordem da STDM Superior, refletindo estruturas de caráter local.

Na Figura 83 são apresentados os elementos morfoestruturais identificados para a sequência. Constatou-se a marcante estruturação regional noroeste, a exemplo da sequência inferior. A faixa de valores positivos de resíduo, orientada a NNW-ENW, encontra-se delimitada por duas zonas de grande variação de espessura na região central do estado do

Paraná, as quais podem representar faixas estruturais condicionando uma maior preservação da sequência. Na porção nordeste da área observa-se um extenso alinhamento de valores negativos, inflexionando-se de NW para ENW, podendo corresponder a um importante alto estrutural.

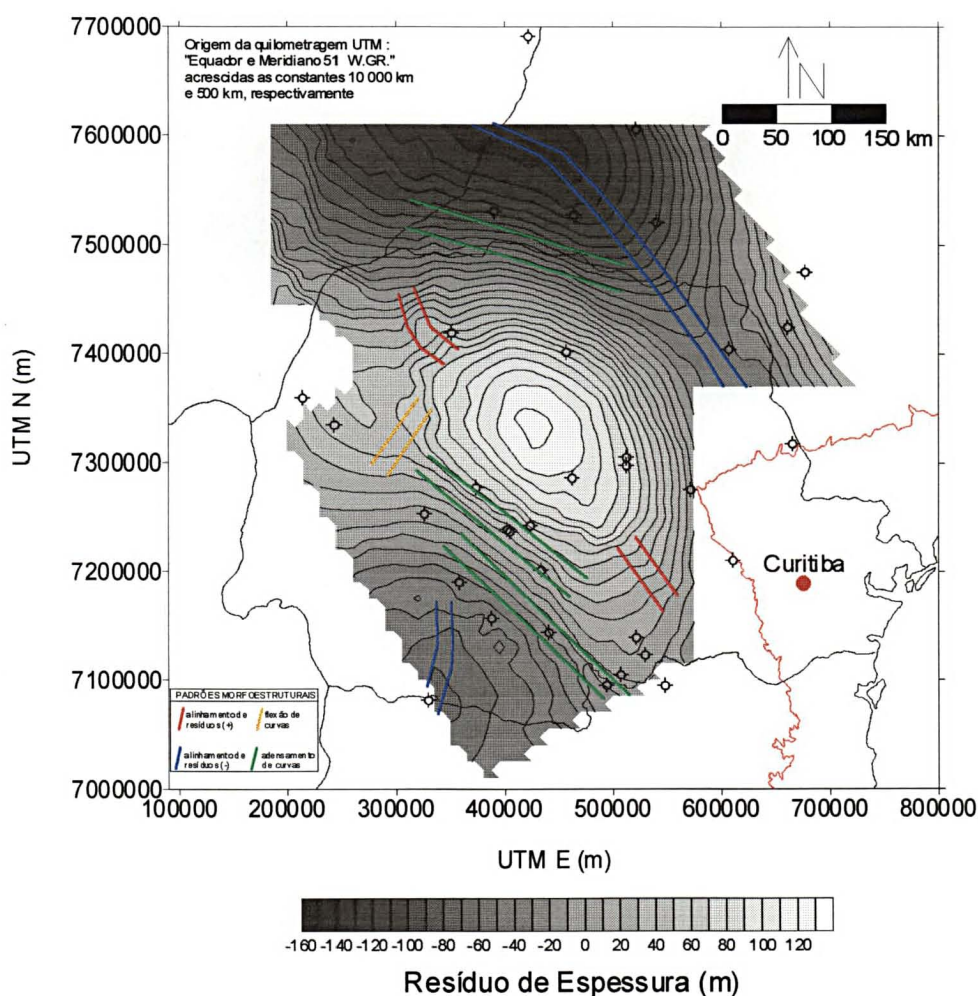


FIGURA 83 - Paleo-estruturas regionais delineadas sobre mapa de resíduos de 3ª ordem da STDm Superior. Notar o predomínio de estruturas NW.

Um fato bastante interessante pode ser visualizado na Figura 84 : a faixa de valores negativos orientada para N40E situa-se na mesma posição espacial ocupada pela faixa de valores positivos da STDm Inferior. Isto revela, provavelmente, uma reversão dos

movimentos desta faixa estrutural ao longo do tempo : durante o período de acúmulo de sedimentos da STDM Inferior, a estrutura atuou como baixo estrutural, e ao final do ciclo tectonossedimentar, comportou-se como alto estrutural.

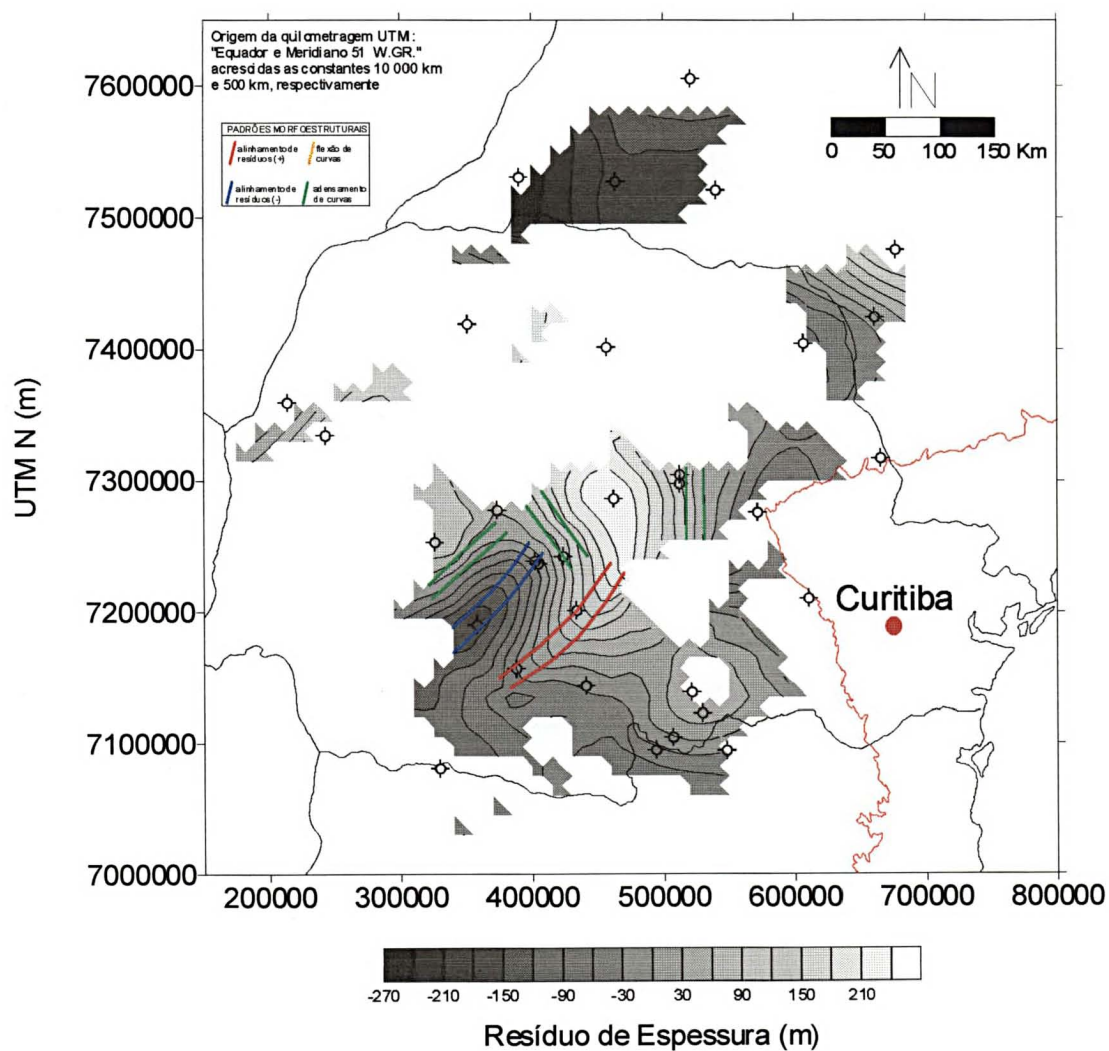


FIGURA 84 - Paleo-estruturas locais identificadas na STDM Superior, com destaque para estruturas nordeste que atuaram desde o início da sedimentação do Grupo Paraná.

6.1.3 STPP INFERIOR

Na estimativa por krigagem foi mapeada a distribuição espacial dos resíduos de 2ª ordem, sendo o mapa resultante apresentado na Figura 85. Muitas são as feições observadas, dentre as quais destacam-se as seguintes :

- a) o sítio deposicional com acumulação de sedimentos mais significativa localiza-se a oeste do estado de São Paulo, quase divisa com o Paraná; percebe-se que esta região foi exatamente o local de menor preservação da STDm Superior;
- b) a região do baixo estrutural identificado na STDm Superior, no centro do Paraná, passou a se comportar como uma região menos faminta por sedimentos na época da deposição da sequência carbonífera-permiana;
- c) interligada ao depocentro central aparece uma estrutura regional, que passa pela região leste de Santa Catarina estendendo-se ao Paraná e sul de São de Paulo. Atualmente esta feição encontra-se parcialmente preservada;
- d) além do alto identificado na região central do Paraná, mais três regiões com as mesmas características ficaram bem delineadas nas porções nordeste, noroeste e sul da bacia;
- e) ao sul do Mato Grosso do Sul parece ocorrer mais uma sub-bacia interligada ao depocentro central. Com isso, a sequência ficaria caracterizada por um cinturão preferencial de acumulação, circundado por altos estruturais.

Os semivariogramas construídos para curtas distâncias apresentaram baixa qualidade, impossibilitando sua modelagem. Com isso, a tentativa de analisar estruturações de menor ordem de grandeza ficou prejudicada, sendo portanto, traçados somente os elementos morfoestruturais identificados no mapa da Figura 86.

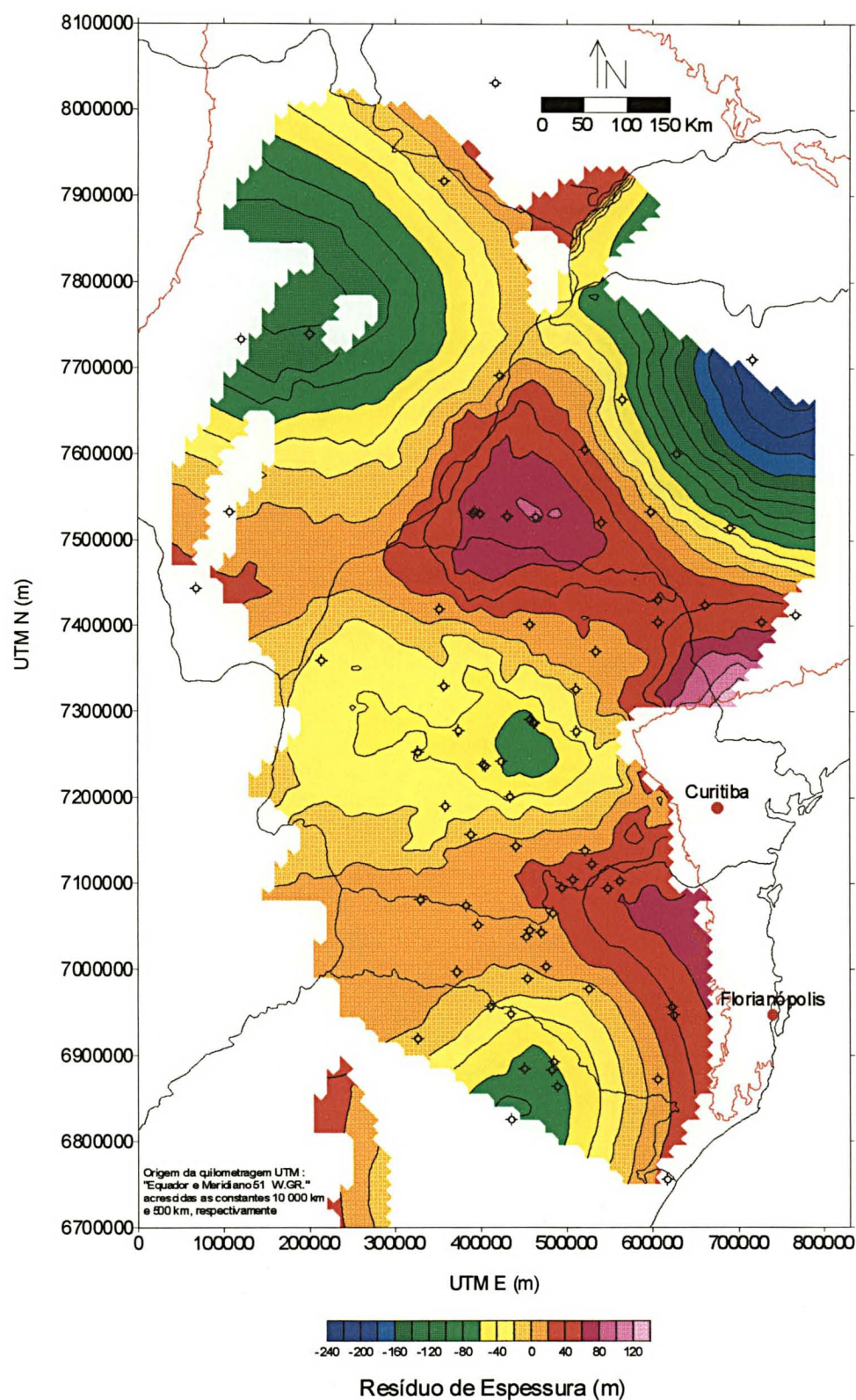


FIGURA 85 - Mapa dos resíduos de 2ª ordem da STPP Inferior, marcado pela notável compartimentação de blocos estruturais na época da sedimentação.

É marcante na Figura 86 a grande quantidade de estruturas presentes nesta sequência, havendo um predomínio das direções nordeste e noroeste; estas, aparentemente, interceptam as primeiras. O alto estrutural localizado no centro do Paraná, encontra-se completamente envolto por estruturas lineares. Feições indicando deslocamento de estruturas mais antigas são de ocorrência comum. Todos esses indicadores de paleo-estruturas, são o registro da intensa atividade tectônica formadora da sequência pensilvaniano-permiana.

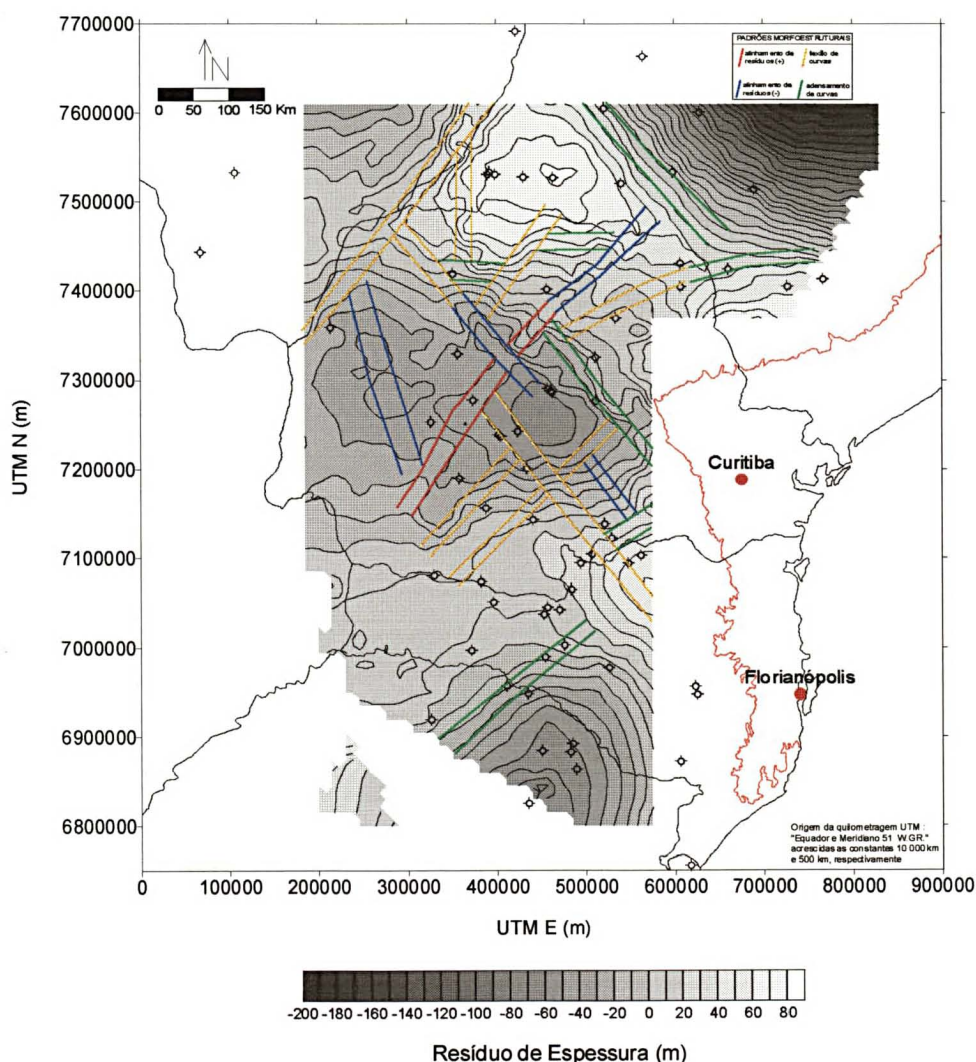


FIGURA 86 - Paleo-estruturas identificadas em mapa de resíduos de 2ª ordem da STPP Inferior.

6.1.4 STPP SUPERIOR

Os resíduos de 2ª ordem foram contornados e o mapa resultante encontra-se na Figura

87. Neste, destacam-se as seguintes feições :

- a) a presença evidente de dois altos, situados a oeste de Santa Catarina e oeste de São Paulo, ambos alongados na direção NNE; outros dois, situados no Mato Grosso do Sul, não ficaram bem definidos devido à falta de dados na região;
- b) a localização de um depocentro encaixado ao longo da direção NNE, posicionado a noroeste do Paraná, alongando-se em direção ao leste do Mato Grosso do Sul;
- c) outros dois embaciamentos ficaram bem caracterizados, estando ambos interligados ao principal. Suas posições geográficas são, aproximadamente, coincidentes àquelas definidas na sequência inferior.

Os resíduos foram submetidos à uma nova análise variográfica com o objetivo de identificar estruturas de pequeno porte. No entanto, após a modelagem do semivariograma omnidirecional seguida pela estimativa por krigagem, notou-se no mapa gerado que as estruturas presentes eram as mesmas que aparecem no mapa da Figura 87. Por este motivo, os resultados não são apresentados.

As feições morfoestruturais traçadas para esta sequência estão ilustradas na Figura 88. Verificou-se que as estruturas com direção geral NNE são predominantes e, ao que parece, são truncadas por estruturas mais recentes de direção NW. Os alinhamentos de valores negativos (altos estruturais) ocorrem, exclusivamente, ao longo da direção NNE.

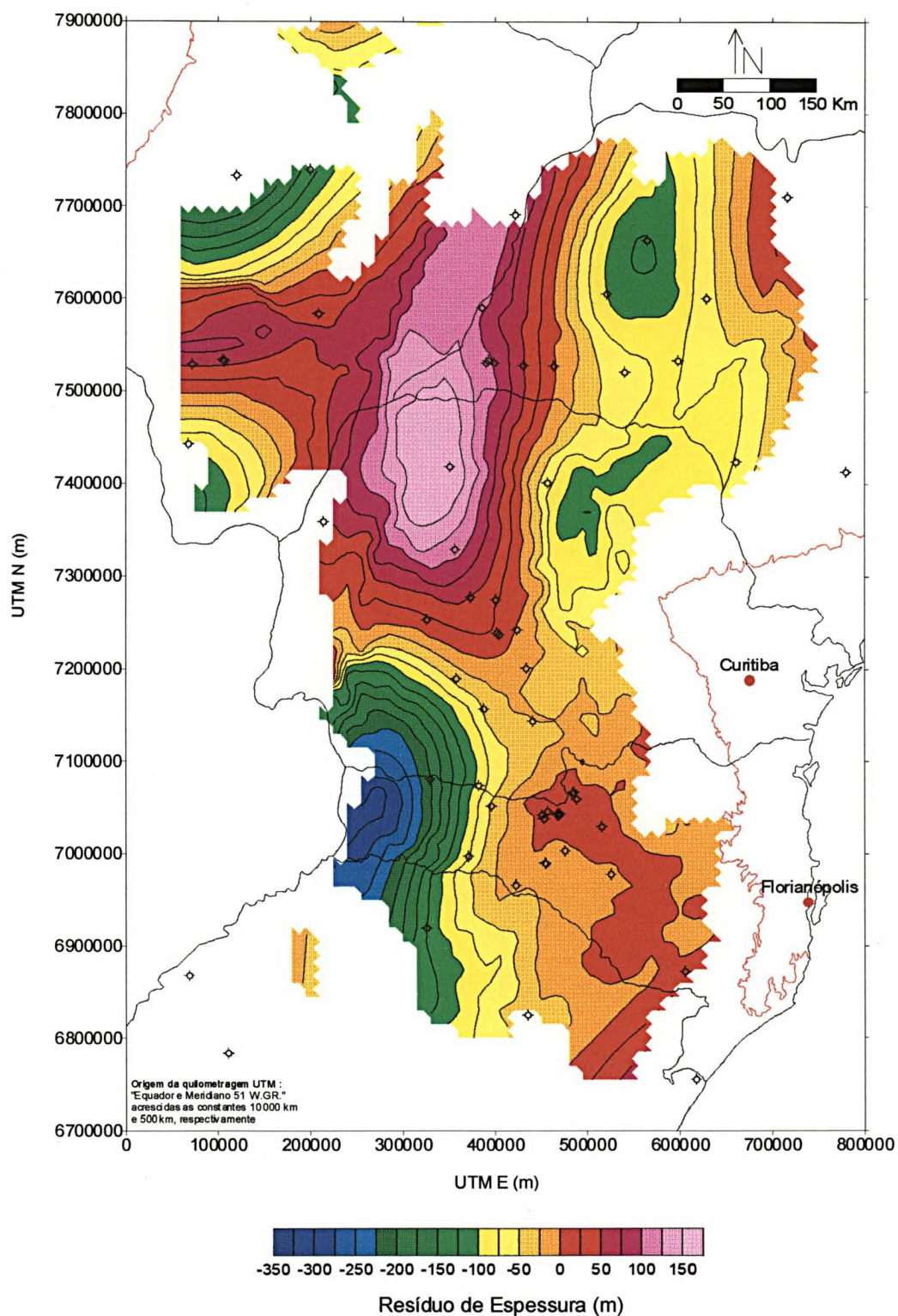


FIGURA 87 - Mapa de contorno dos resíduos de 2ª ordem da STPP Superior, com destaque para a forte estruturação regional NNE.

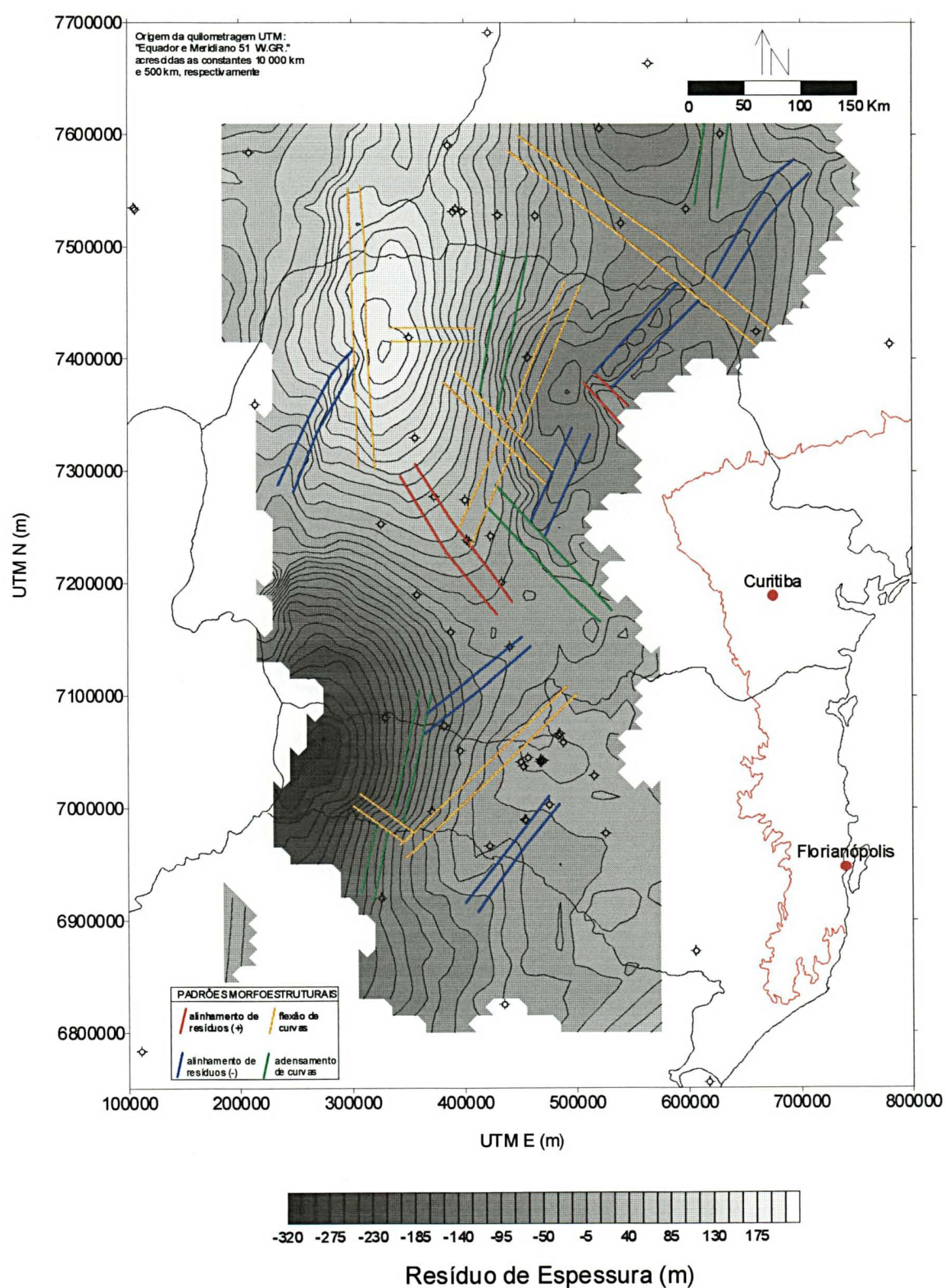


FIGURA 88 - Paleo-estruturas traçadas sobre mapa de distribuição dos resíduos de 2ª ordem da STPP Superior.

6.1.5 STTJ INFERIOR

Na estimativa por krigagem foram utilizados os resíduos de 3ª ordem, e o mapa gerado é apresentado na Figura 89. Tentativamente, foi desenvolvida a análise variográfica seguida por krigagem, para identificar micro-regionalizações. No entanto, o mapa gerado não trouxe nenhuma contribuição significativa e, com isso, somente as feições obtidas com o mapa da Figura 89 foram analisadas :

- a) dois altos sindeposicionais ficaram muito bem definidos : o primeiro ocupa toda porção centro-leste do Paraná e parte de Santa Catarina, estando a grosso modo, orientado a NW; o segundo limita a bacia a noroeste e, possivelmente, estende-se para sul e norte definindo o limite deposicional da sequência;
- b) é notável a ocorrência de quatro embaciamentos distintos e interligados entre si, estando dois orientados a NW e outros dois para NS.

No mapa da Figura 90 observa-se que as feições morfoestruturais ocorrem em pequeno número, restringindo-se praticamente à algumas faixas NNE. Talvez a identificação de poucas estruturas lineares esteja relacionada à própria variável utilizada (resíduo de 3ª ordem), na qual ainda permaneceu boa parte da estruturação regional e, naturalmente, provocando a suavização dos resultados.

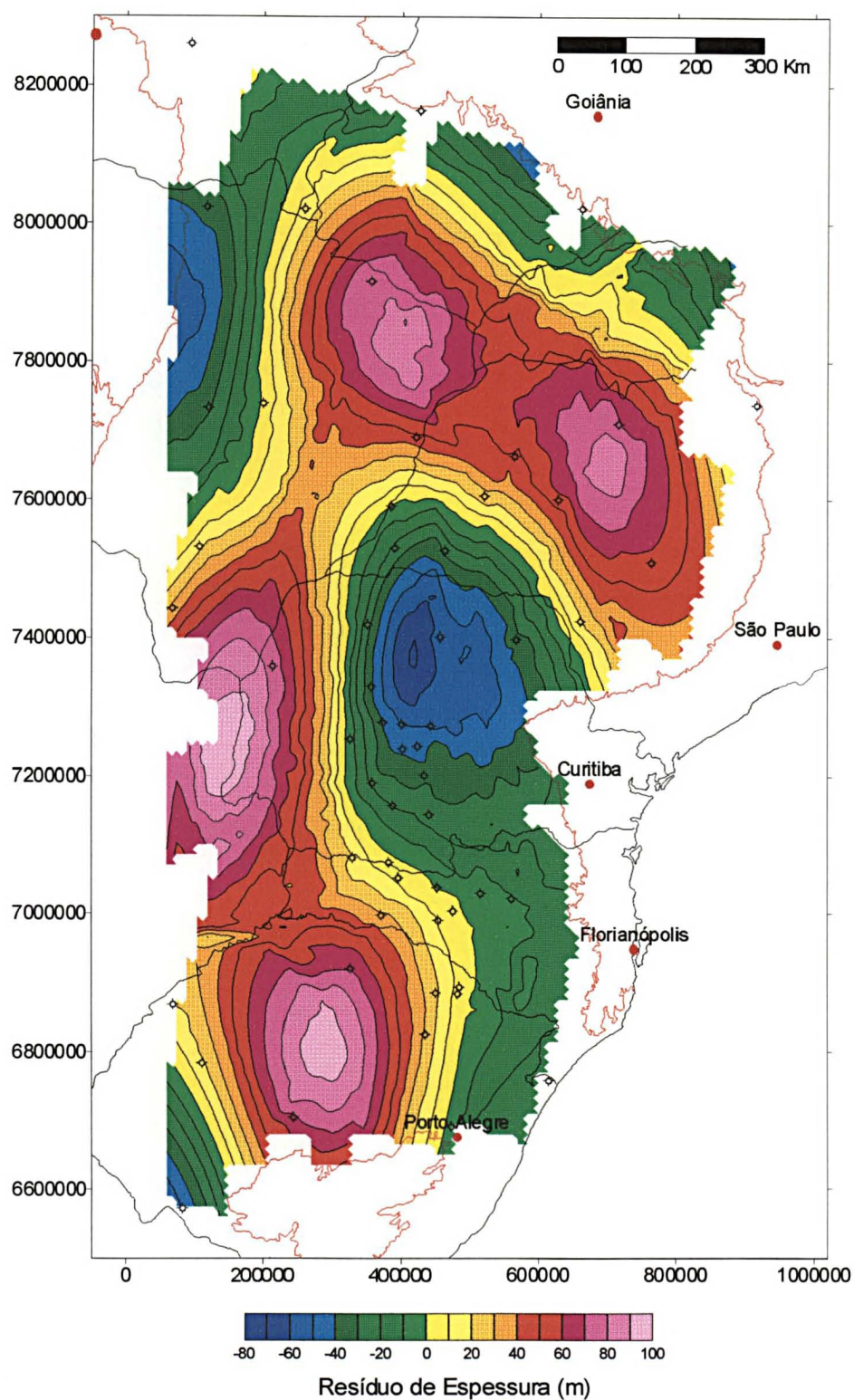


FIGURA 89 - Mapa dos resíduos de 3ª ordem da STTJ Inferior, onde se destaca a presença de um grande cinturão deposicional interligando quatro sub-bacias.

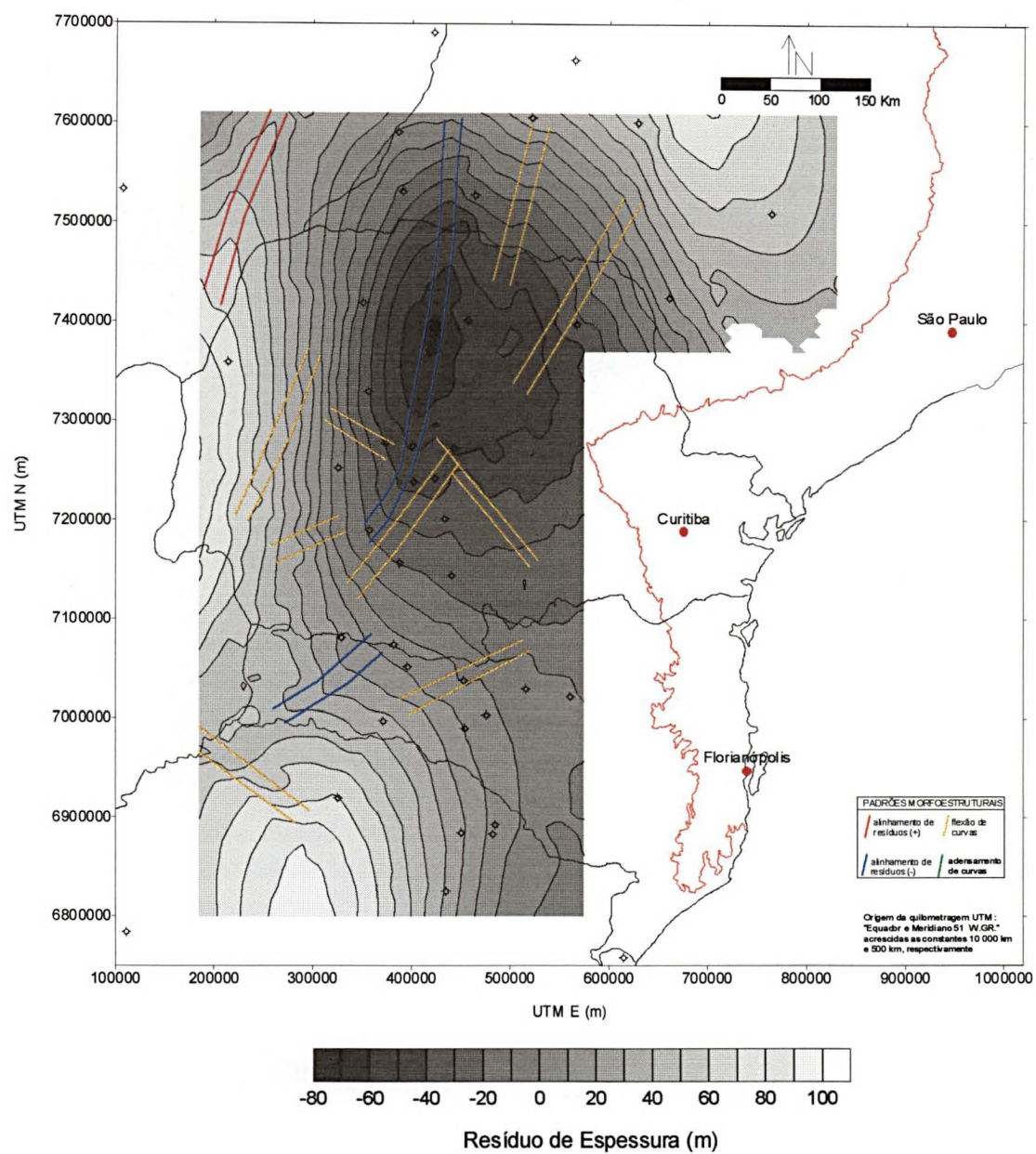


FIGURA 90 - Paleo-estruturas traçadas sobre mapa de contorno dos resíduos de 3ª ordem da STTJ Inferior.

6.1.6 INTRUSIVAS

Sobre o mapa de contorno resultante da interpolação dos resíduos de 3ª ordem (Figura 91) foram feitas algumas considerações :

- a) percebe-se claramente, pela disposição dos contornos, que os processos envolvidos no alojamento dos corpos intrusivos tiveram um forte controle regional NNE.
- b) as maiores espessuras residuais encontram-se na região limítrofe dos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul e do Paraguai; parece fazer parte de uma faixa preferencial de alojamento que segue na direção NNE até o norte do Mato Grosso do Sul; outra faixa de importância secundária ocorre na região central de Santa Catarina, com a mesma direção;
- c) a zona que menos sofreu o evento intrusivo ocorre sob a forma de uma faixa NNE, que vem do oeste de Santa Catarina e passa pelo centro do Paraná;

A obtenção de bons semivariogramas a curtas distâncias permitiu avaliar a continuidade espacial do fenômeno, em busca de estruturas de caráter local. Foram modelados os semivariogramas das direções N15E e N75W, respectivamente a de maior e menor continuidade espacial (Figura 92). Os parâmetros variográficos utilizados na krigagem estão listados na Tabela 18.

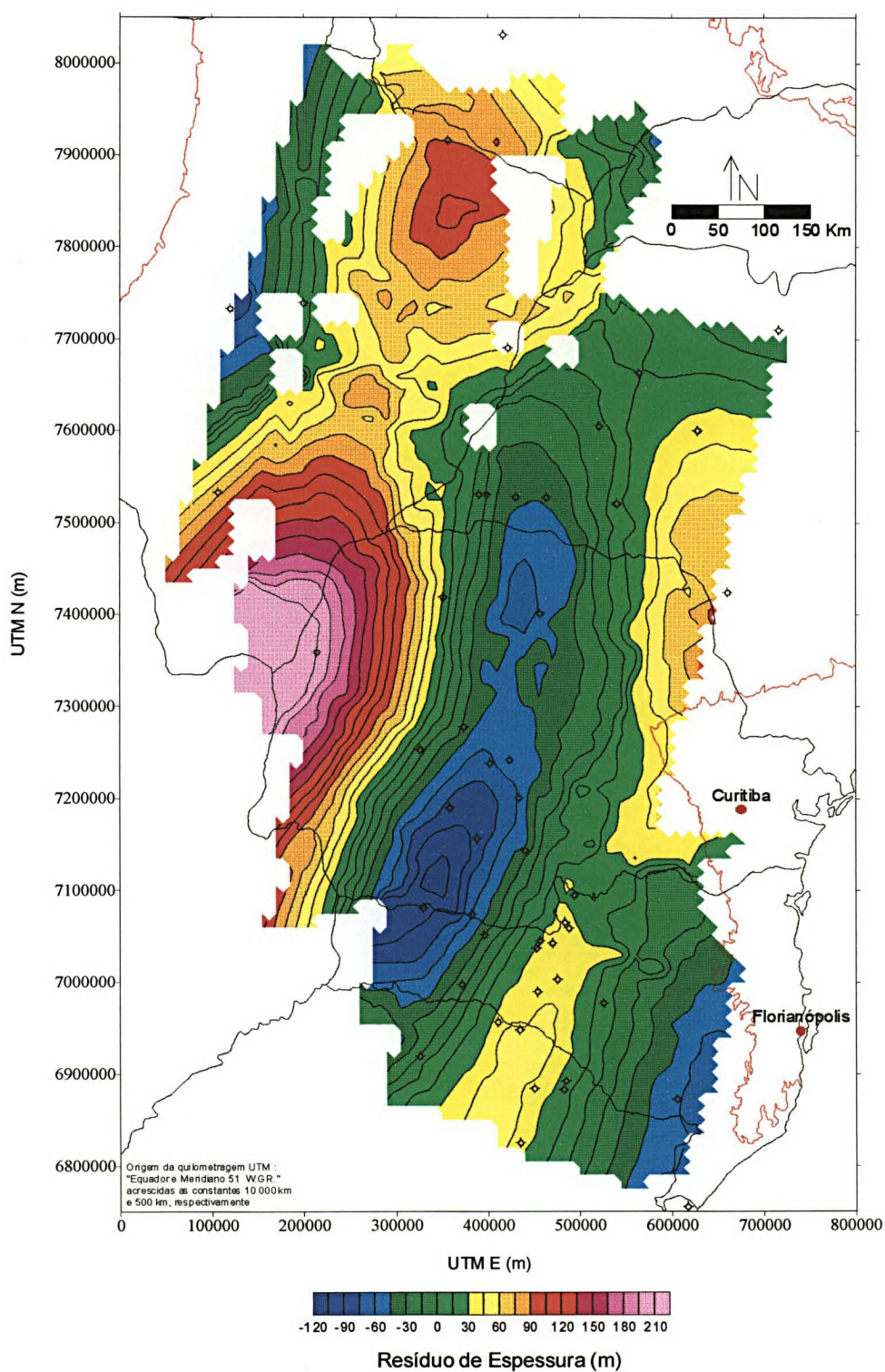
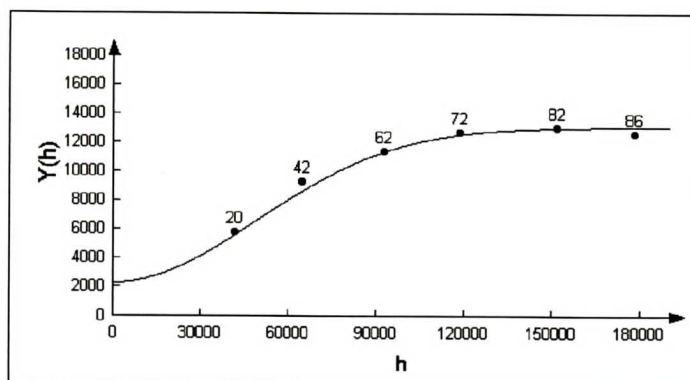
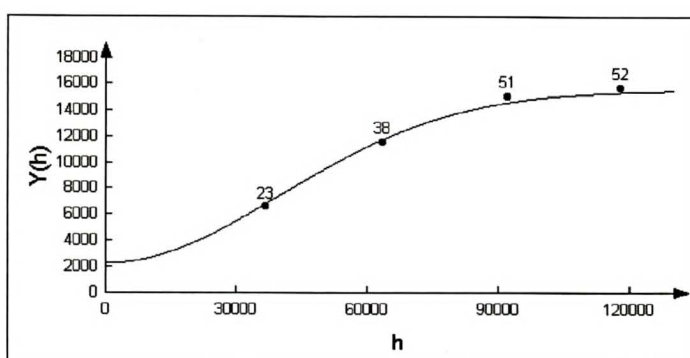


FIGURA 91 - Mapa de distribuição dos resíduos de 3ª ordem de espessura das intrusivas. Notar o forte controle NNE durante o alojamento dos corpos.



(A)



(B)

FIGURA 92 - Modelos ajustados aos semivariogramas direcionais : (A) N15E e (B) N75W. Os passos são de 30 ± 30 km e a tolerância angular é de 45° .

TABELA 18 - Parâmetros utilizados nas modelagens dos semivariogramas direcionais.

Unidade	Dir.	Cp.	Modelo	N	S	R	R.A.	Elipse Pesquisa
INTRUS.	N15E	1 ^a	gauss.	2.300	10.800	118.650 97.750	1,21	Tipo : quadrante Dados por setor : 6 Mínimo total : 3 Máx. setores vazios : 2 R ₁ : 119 km/R ₂ : 98 km
	N75W	2 ^a	gauss.		2.500	5.000.000 97.750	51	

No mapa onde estão representadas as pequenas estruturas (Figura 93) destaca-se a justaposição de duas faixas NNE, sendo aquela situada na região central de Santa Catarina relativamente "mais quente" que a situada logo a noroeste. Esta estruturação também foi identificada no mapa da Figura 91.

A análise morfoestrutural foi desenvolvida sobre o mapa da Figura 91 e os resultados são apresentados na Figura 94. Observa-se que a estruturação predominante apresenta direção NNE, caracterizada por alinhamentos de valores positivos e negativos, limitados por faixas de concentração de curvas. Outro fato interessante é que estas estruturas NNE apresentam-se deslocadas por lineamentos WNW, mais recentes.

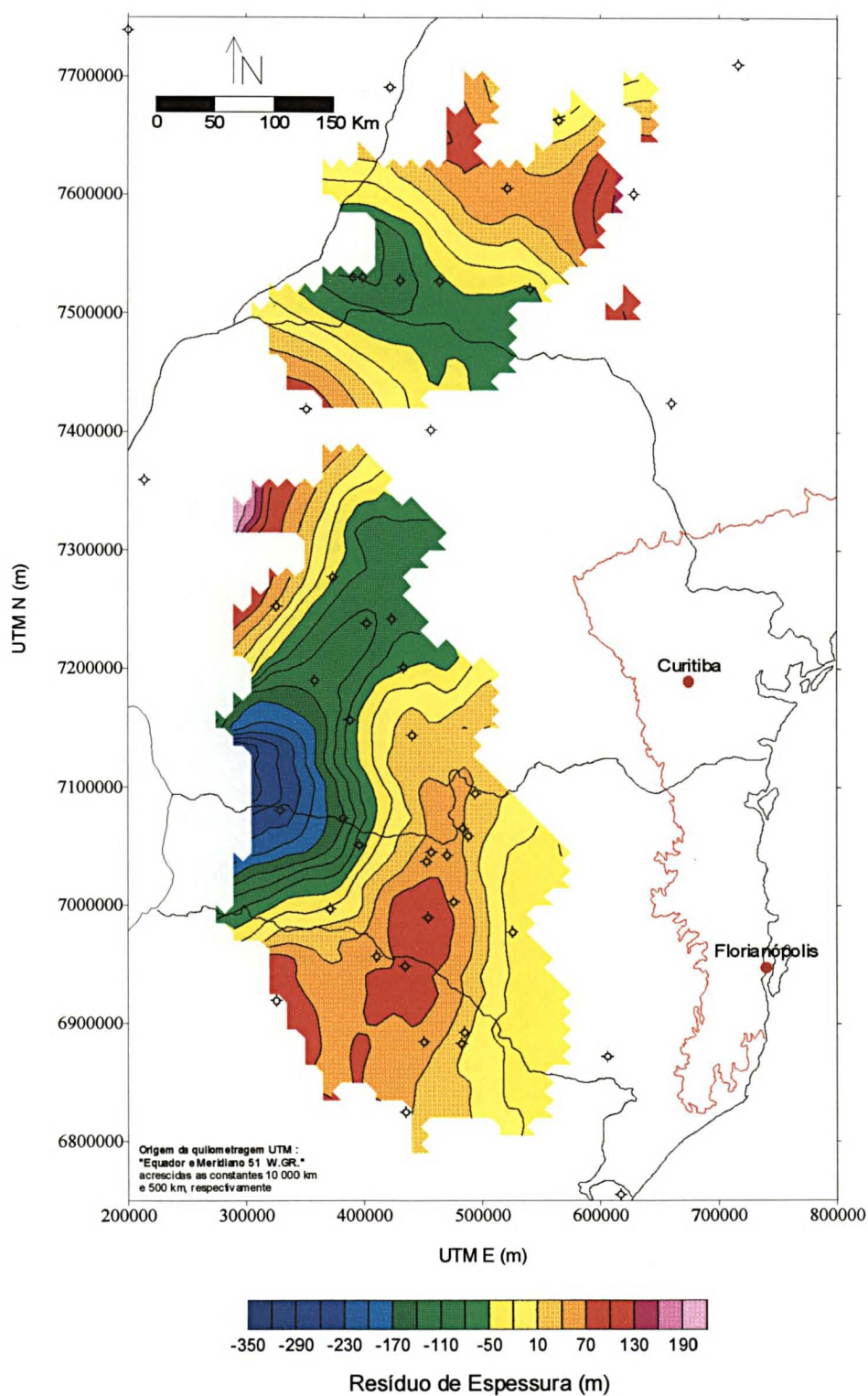


FIGURA 93 - Mapa de distribuição dos resíduos de 3ª ordem das intrusivas, refletindo estruturas de caráter local.

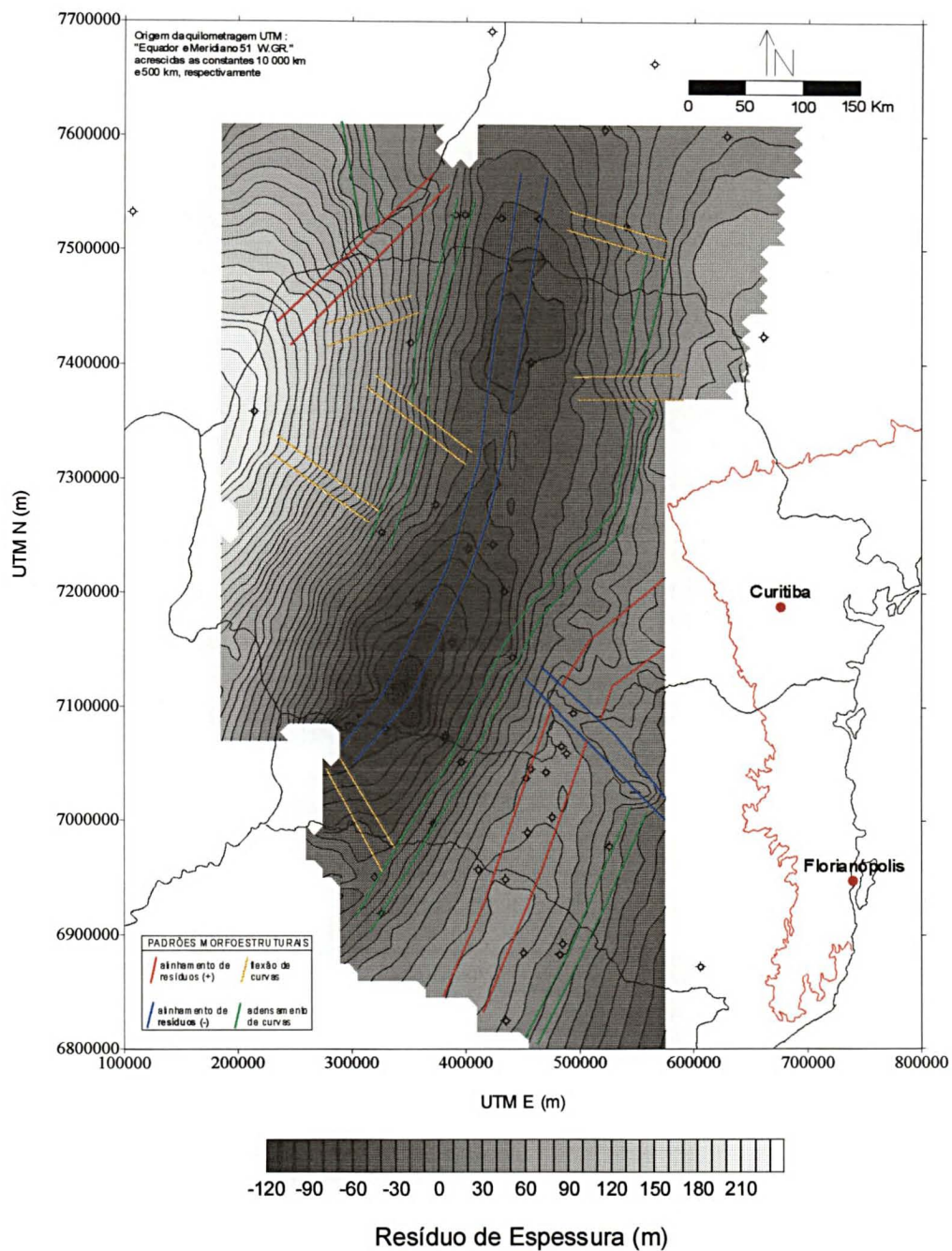


FIGURA 94 - Paleo-estruturas identificadas sobre o mapa de contorno dos resíduos de 3ª ordem das intrusivas.

6.1.7 GRAVIMETRIA

Após a retirada da tendência dos dados gravimétricos (capítulo 5.1), os resíduos de 3ª ordem foram submetidos às técnicas de análise variográfica, krigagem e sombreamento de relevo. Na Figura 95 é apresentado o mapa de contorno dos resíduos, onde se observam três principais baixos gravimétricos residuais na bacia, localizados nas regiões centro-leste de Santa Catarina/sudoeste do Paraná, nordeste do Mato Grosso do Sul e oeste de Minas Gerais. Já os altos ocorrem ao sul do Rio Grande do Sul, noroeste do Mato Grosso do Sul e outro sob a forma de um cinturão, passando pelo oeste do Paraná e São Paulo com direção NE, inflexionando-se para NNW e seguindo pelo norte de São Paulo e sul de Goiás. Esta estrutura apresenta limites bem definidos e largura média de 200 km. O Arco de Ponta Grossa mostra nítida resposta gravimétrica e representado por uma cunha de valores altos.

Para destacar as estruturas com direção nordeste (pois estas são as predominantes) o relevo gravimétrico residual foi sombreado (Figura 96), o que permitiu evidenciar a compartimentação em faixas com relevo mais acidentado intercaladas à faixas com relevo mais suave. Provavelmente, esta característica gravimétrica esteja refletindo a justaposição lateral de entidades geológicas distintas, com propriedades litológicas e deformacionais particulares.

Sobre o mapa de distribuição dos resíduos de anomalia Bouguer foram traçados os principais alinhamentos de altos e baixos gravimétricos, além de faixas demarcadas pela alta concentração de curvas. Vale lembrar que mesmo trabalhando-se com resíduos de 3ª ordem, ainda permaneceram embutidas nos dados, anomalias regionais com grande comprimento de onda, as quais acabaram mascarando certas estruturações de âmbito local. Mesmo assim, na maioria dos casos foi possível verificar a continuidade das estruturas locais além das estruturas regionais que as interceptavam.

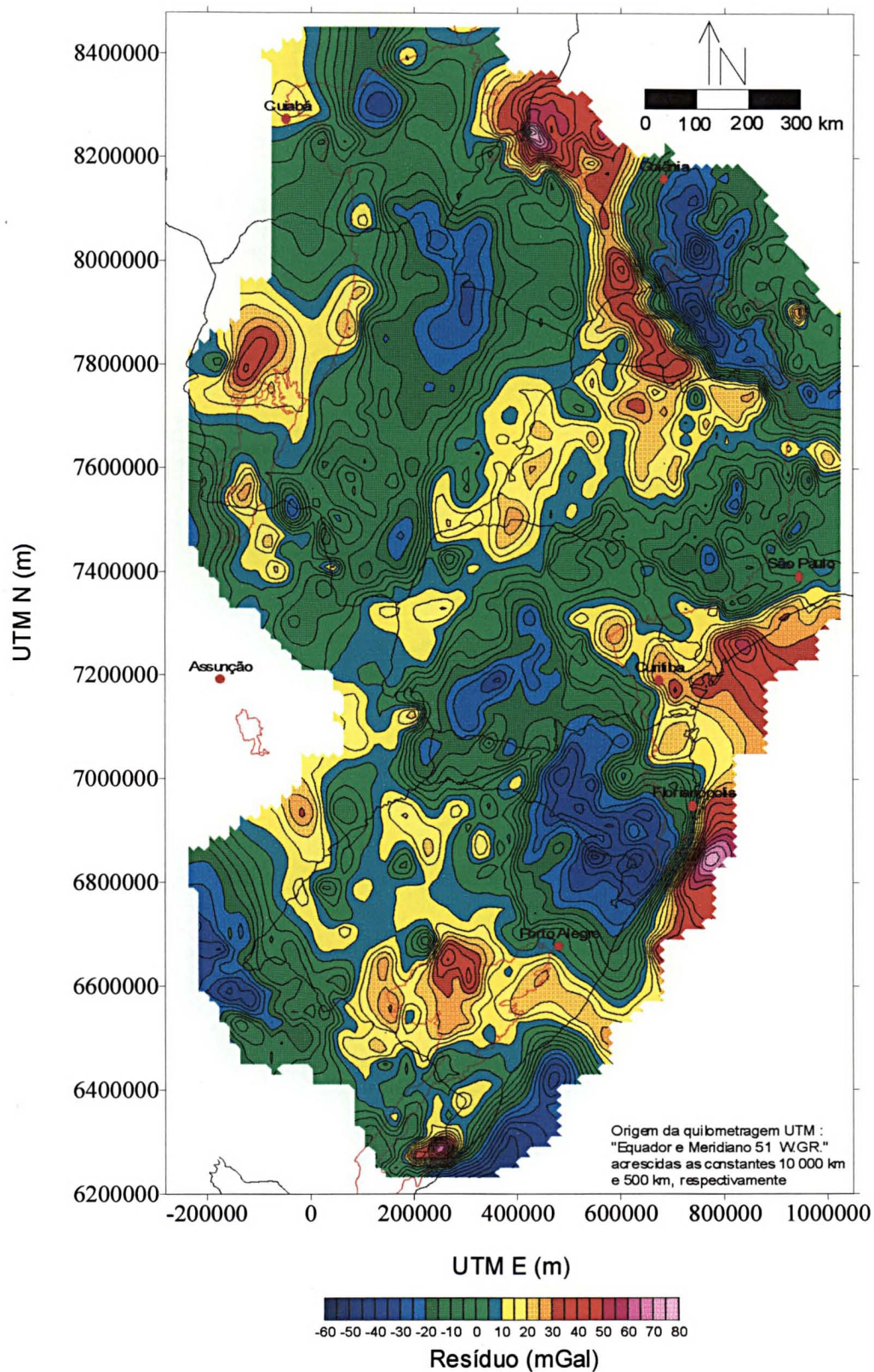


FIGURA 95 - Mapa de distribuição dos resíduos de 3ª ordem dos dados gravimétricos.

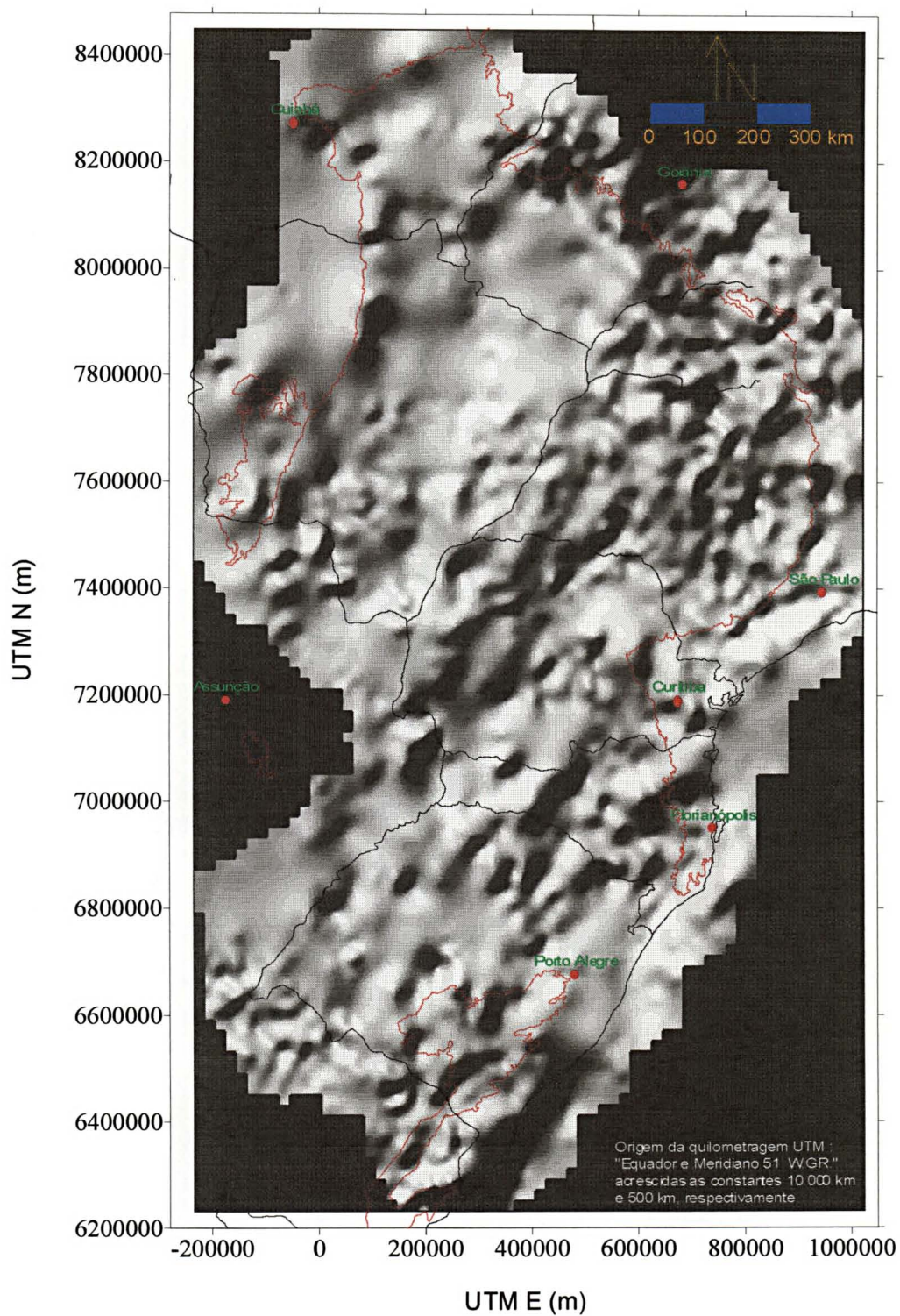


FIGURA 96 - Sombreamento do relevo gravimétrico residual com iluminação de N35W, destacando-se as principais estruturas NE.

No mapa de análise morfológica dos contornos (Figura 97) verifica-se a grande quantidade de elementos lineares, com destaque para aqueles de direção nordeste. A feição morfológica do tipo concentração de curvas é a que predomina, separando zonas com altos valores de resíduo daquelas com baixos valores e, possivelmente, devem corresponder à faixas estruturais.

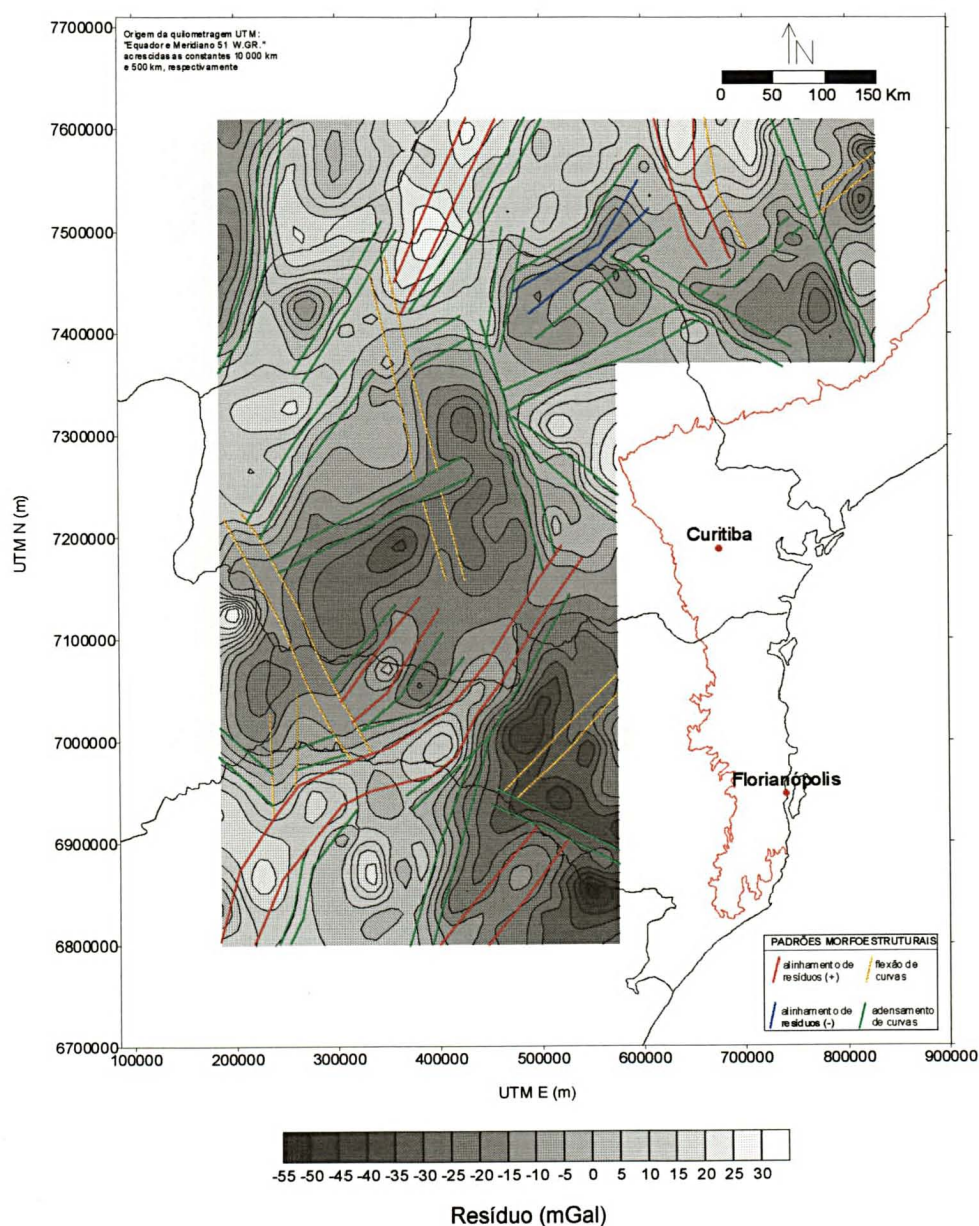


FIGURA 97 - Feições lineares do relevo gravimétrico residual, com predominância de estruturas NE.

6.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO E PROTEÇÃO DOS SISTEMAS PETROLÍFEROS

Como já salientado no capítulo 2.3, um sistema petrolífero é constituído por uma série de atributos e eventos geológicos, os quais agindo numa sequência temporal adequada, proporcionarão seu perfeito funcionamento. Idealmente, todas as funções do sistema (alimentação, armazenamento, temporal e preservação) devem ser compreendidas e seus componentes (distribuições das rochas geradora, reservatório e selante,...) mapeados, a fim de se caracterizar quais atributos geológicos são sugestivos (critérios diagnósticos) da presença de uma acumulação.

No entanto, devido à falta de informações disponíveis na literatura a respeito das distribuições regionais de muitas variáveis exploratórias na Bacia do Paraná, a pesquisa foi direcionada somente para a avaliação da importância dos lineamentos no controle das acumulações de hidrocarbonetos. Em função do banco de dados exploratórios ser incompleto, a discriminação de áreas favoráveis (alvos) deve ser vista com cautela (capítulo 6.3). A intenção do presente estudo não foi determinar a probabilidade de ocorrência de uma acumulação nesta ou naquela posição da bacia, mas tão somente definir o poder explicativo das estruturas tectônicas para a ocorrência das acumulações importantes já conhecidas.

Mesmo assim, achou-se conveniente agregar à esta avaliação algumas informações referentes ao fator geração e à função preservação dos sistemas petrolíferos. Para a delimitação das áreas com maior potencial gerador de cada sistema foram utilizadas informações disponíveis no trabalho de Goulart e Jardim (1982), obtidas na época do Consórcio Paulipetro. Estes autores avaliaram geoquimicamente as formações Ponta Grossa e Irati e elaboraram uma série de mapas geoquímicos, dentre os quais, os mapas de isomaturidade, gerados com a aplicação do método teórico de Lopatin. Para as duas unidades utilizou-se aqui o modelo que leva em consideração não haver variação no gradiente

geotérmico; o limite externo de cada uma das áreas delimitadas compreende, segundo aqueles autores, à profundidade a partir da qual as rochas potencialmente geradoras adentram na janela de geração de óleo.

Na análise de qualquer sistema petrolífero, a questão preservação-retenção do petróleo deve ser muito bem investigada, já que suas propriedades físicas e químicas podem ter sido modificadas mesmo após o trapeamento dos fluidos. Alguns processos de alteração do petróleo, tais como a biodegradação, a atuação de águas meteóricas e a alteração termal, podem ter atuado no decorrer da história geológica da Bacia do Paraná, provocando drástica redução do volume e do valor comercial do petróleo previamente acumulado. Além disso, as atividades tectônicas mesozóicas e cenozóicas devem ter contribuído para a remobilização dos fluidos para um novo estilo de trapa e/ou causando a dispersão em direção à superfície.

Durante o Consórcio Paulipetro foi desenvolvido um estudo de avaliação da função preservação, o qual indicou a profundidade de 2000 m de soterramento atual das rochas-reservatório, como sendo aproximadamente o limite da janela de biodegradação da Bacia do Paraná (Soares *com. verb*). No sentido de delimitar as áreas protegidas dos dois sistemas petrolíferos analisados no presente estudo, optou-se em adotar a profundidade de 1500 m como valor limítrofe da janela de biodegradação, para cada sistema. Partiu-se da premissa de que os hidrocarbonetos presentes nos reservatórios situados atualmente em profundidades próximas a 1500 m, ainda não tiveram tempo de dispersarem e também de serem alterados física e quimicamente, mesmo após às atividades epirogenéticas do Cenozóico.

Uma constatação que reforçou a opção pela profundidade de 1500 m, foi a de que todos os poços produtores da bacia localizam-se dentro das áreas definidas como protegidas. Os mapas das áreas protegidas, bem como aqueles dos limites das geradoras, são apresentados nas figuras 98 e 99.

Foram gerados dois mapas para cada um dos dois sistemas petrolíferos analisados neste trabalho : um de isomaturidade das rochas geradoras (Ponta Grossa e Irati), com base em Goulart e Jardim (1982), e outro que mostra as rochas-reservatório em potencial posicionadas fora da janela de biodegradação. Sobre cada um dos mapas foram superpostos os poços que chegaram a produzir algum óleo e/ou gás nos testes de formação.

O mapa de isomaturidade da Formação Ponta Grossa (Figura 98) inclui além das áreas consideradas maduras, aquelas que já atingiram o grau de supermaturidade; estas encontram-se posicionadas nas porções mais a oeste da área de estudo. Nesta figura, os limites nordeste e sul correspondem, aproximadamente, ao limite de ocorrência da Formação Ponta Grossa.

Já o mapa de isomaturidade da Formação Irati (Figura 99) mostra a unidade madura somente na porção oeste da área. É bom lembrar que ambos os mapas foram elaborados considerando-se não haver variação no gradiente geotérmico da bacia e, portanto, é bem provável que ocorram outras áreas maduras relacionadas ao aquecimento anômalo das geradoras, proporcionado pelas altas temperaturas vinculadas à atividade magmática mesozóica.

Algumas particularidades interessantes podem ser constatadas nas figuras abaixo: no Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé os poços produtores ocorrem, com exceção de dois, todos dentro da área potencialmente madura. Já no sistema Irati-Rio Bonito/Tietê todos os poços, com exceção de um, ocorrem fora da área considerada madura.

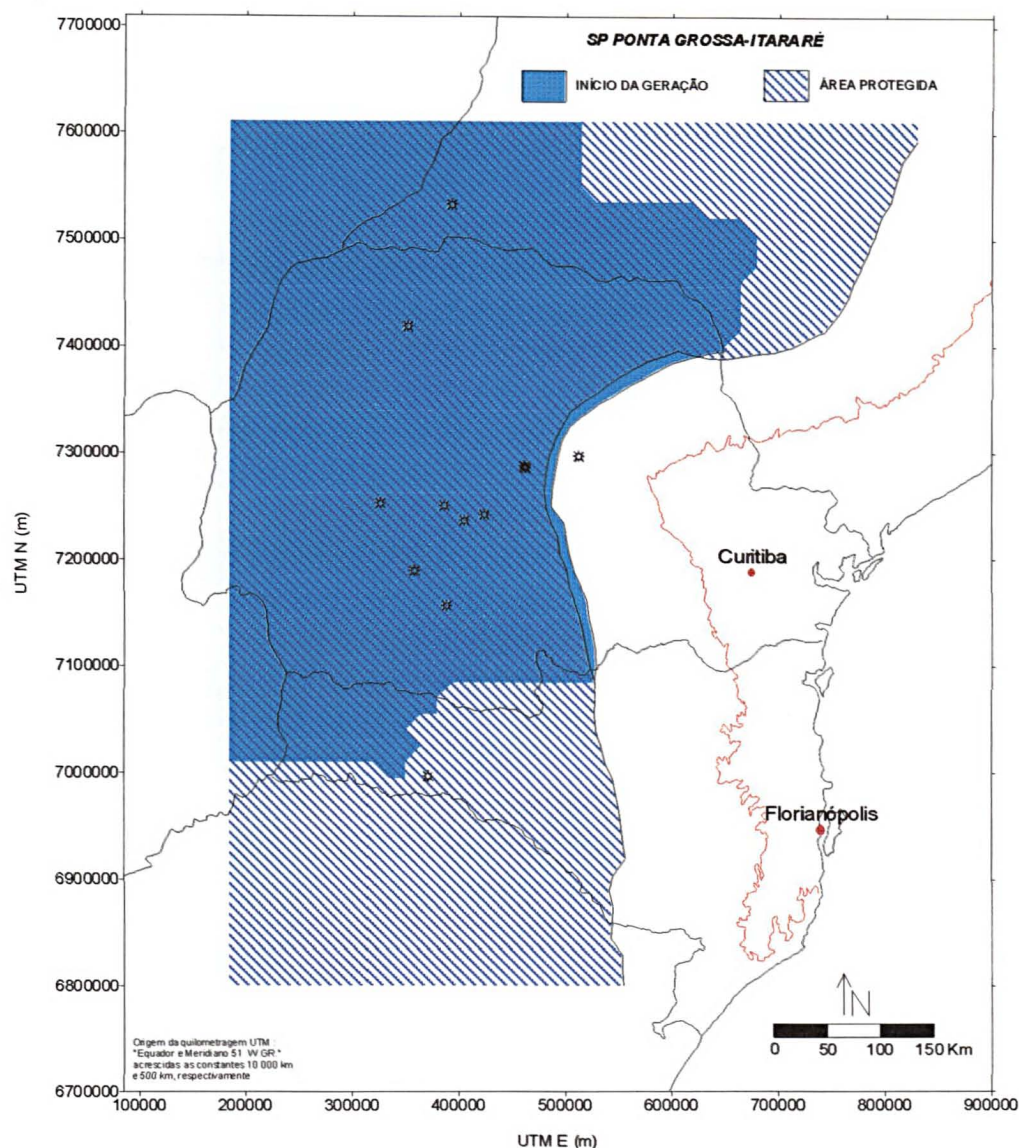


FIGURA 98 - Limites das áreas com maior potencial de geração e proteção do Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé. Em hachurado, os reservatórios potenciais encontram-se à profundidades superiores a 1500 m. Em azul, a Formação Ponta Grossa encontra-se, de acordo com Goulart e Jardim (1982), dentro da janela de geração.

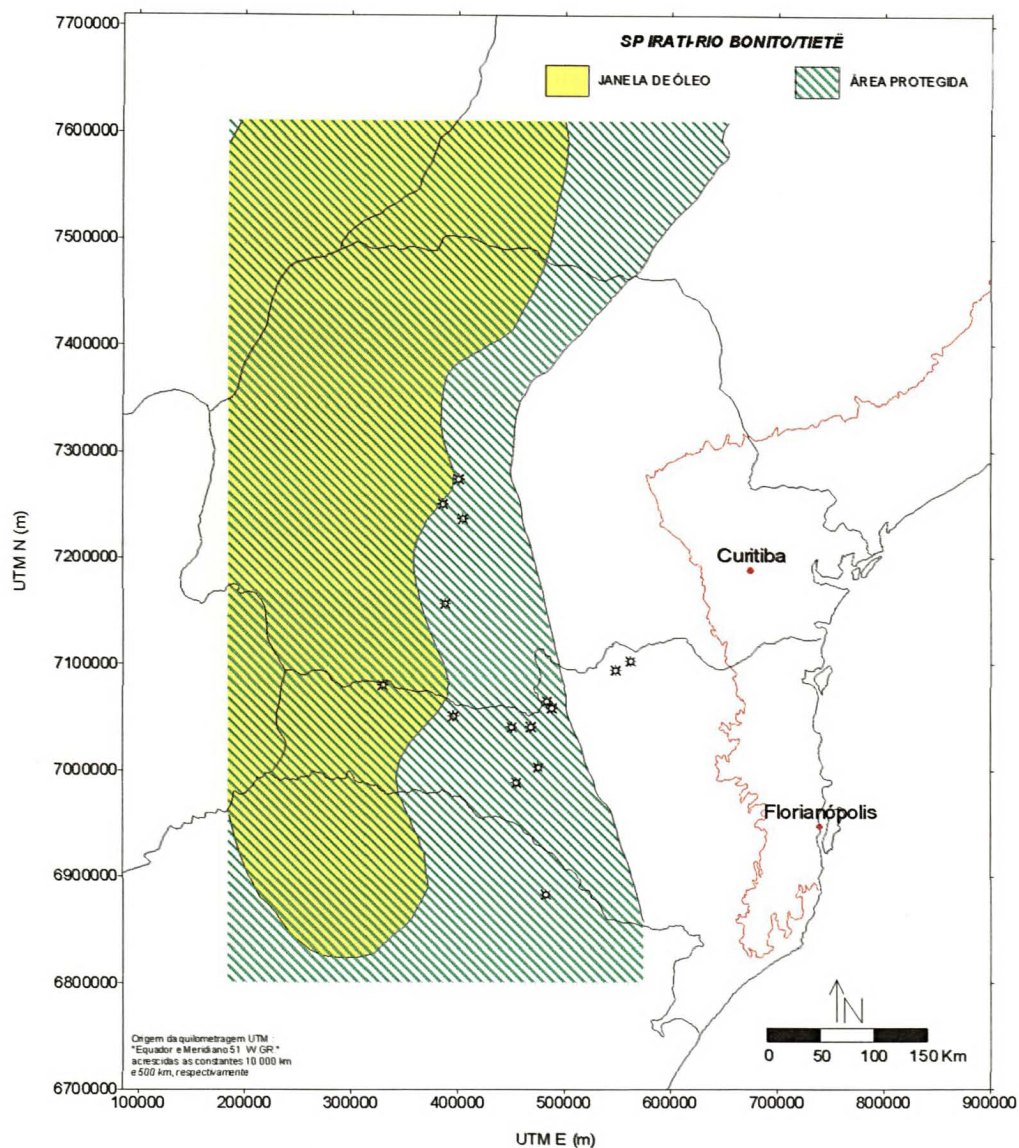


FIGURA 99 - Limites das áreas com maior potencial de geração e proteção do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê. Em hachurado, os reservatórios potenciais encontram-se à profundidades superiores a 1500 m. Em amarelo, a Formação Irati encontra-se, de acordo com Goulart e Jardim (1982), dentro da janela de geração óleo.

6.3 QUANTIFICAÇÃO DE FAVORABILIDADE

Os paleolineamentos obtidos com a análise morfoestrutural dos mapas de contorno de resíduos, os lineamentos atualmente presentes na bacia (Soares *et al.* 1982; ver Figura 105) e também as áreas geradoras e protegidas dos sistemas petrolíferos foram considerados como variáveis na análise de favorabilidade.

A área de concentração dos estudos foi dividida em celas com dimensões de 15 x 15 km (Figura 100). Foram escolhidas estas dimensões, pois partiu-se da premissa de que alguns dos paleolineamentos definidos neste trabalho devem ter atuado como áreas de alimentação do sistema acumulador e, portanto, até uma certa distância dessas grandes estruturas, caso ocorram trapas associadas, o petróleo teria se acumulado. Considerando que até a distância de 15 km de um determinado paleolineamento a migração sofrida pelos fluidos foi restrita, as possíveis estruturas de fechamento relacionadas teriam, possivelmente, retido óleo e/ou gás de melhor qualidade. Como já discutido no capítulo 1.1, os campos de petróleo tendem a ocorrer lateralmente aos grandes lineamentos, associados às estruturas de fechamento de menor ordem de grandeza. Estas não foram analisadas neste trabalho devido à ausência de informações publicadas.

Após a sobreposição dos atributos geológicos à malha de celas ilustrada na Figura 100, os mesmos puderam ser discretizados atribuindo-se valor 1, quando verificada a presença da variável no *pixel*, e valor 0 quando verificada sua ausência. A composição das planilhas de dados foi feita no programa EXCEL, e um exemplo é ilustrado na Tabela 19. Observa-se que na última coluna desta tabela são dadas referências a respeito da presença de poços produtores (+1) ou secos (-1) e também quando não há informação de poço (0).

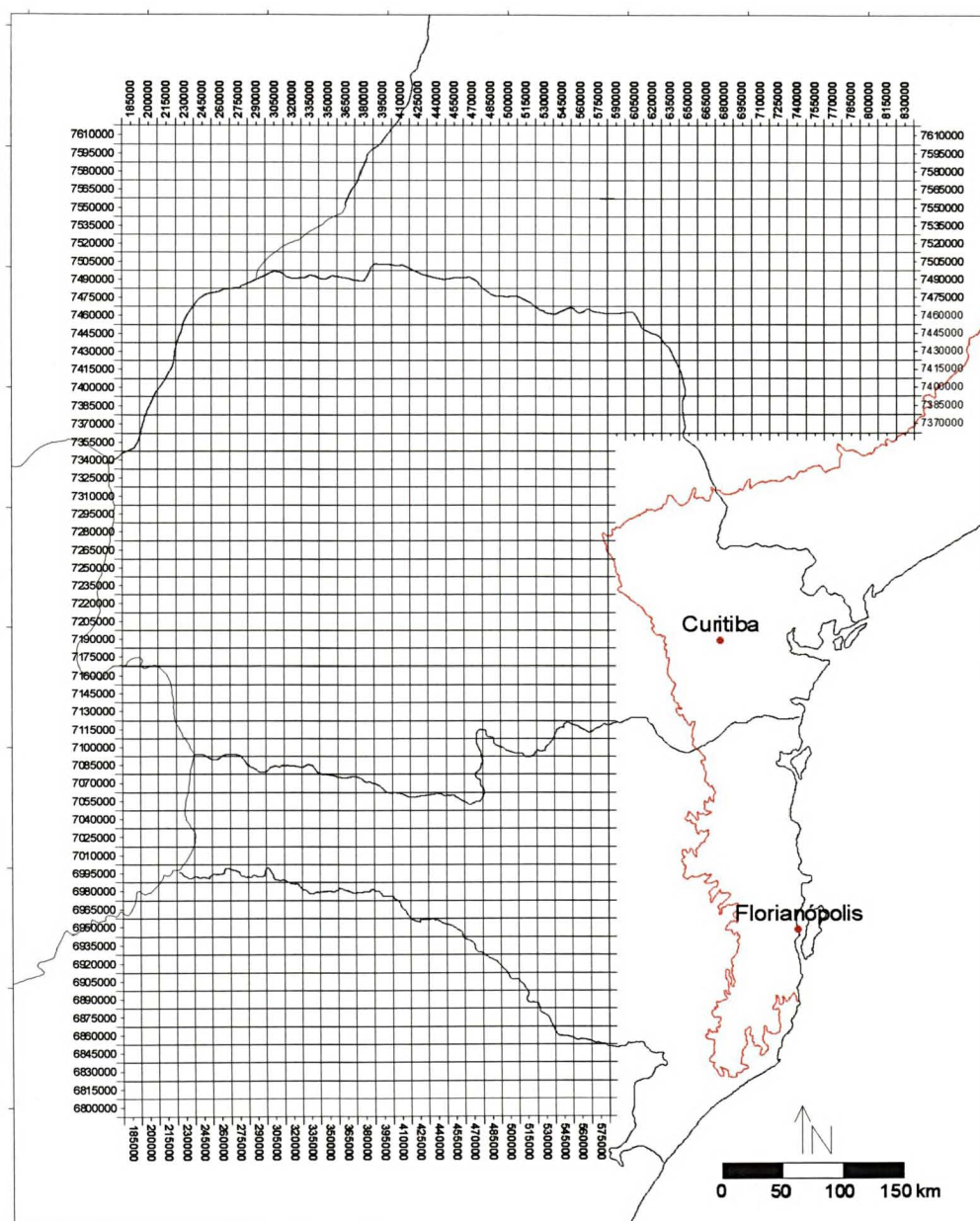


FIGURA 100 - Disposição da malha de celas utilizada na etapa de quantificação das relações entre variáveis e ocorrências. Cada cela apresenta uma área de 225 km².

TABELA 19 - Exemplo de parte de uma planilha de dados construída no Excel. Notar que v_1 , v_2 , v_3 e v_4 são as variáveis cujos valores foram discretizados com valores 1 e 0.

coord. x	coord. y	v_1	v_2	v_3	v_4	※
260000	7355000	1	0	0	0	1
260000	7370000	1	0	0	0	1
260000	7385000	1	0	0	0	1
260000	7400000	0	0	0	0	0
260000	7415000	0	0	0	0	0
260000	7430000	0	0	1	0	-1
260000	7445000	0	0	1	0	-1
260000	7460000	0	0	0	0	0
260000	7475000	0	0	0	0	0

Os lineamentos provenientes das análises dos diferentes conjuntos de dados (espessuras, gravimetria, radar) foram considerados como variáveis diferentes e, além disso, dentro de um mesmo conjunto, os lineamentos foram classificados por direção : 1) leste-oeste (N75E - N75W); 2) nordeste (N75E - N20E); 3) norte-sul (N20E - N30W) e 4) noroeste (N30W - N75W). Esta classificação possibilitou discriminar um maior número de variáveis e, com isso, as informações provenientes da quantificação de favorabilidade puderam ser avaliadas e interpretadas com maior segurança.

No caso dos lineamentos obtidos com a análise da distribuição das intrusivas, além da classificação por direção foram também consideradas como variáveis diferentes, os alinhamentos de valores de resíduo positivo ("zonas quentes") e negativo ("zonas frias"). O objetivo foi determinar se havia ou não correlação espacial entre as acumulações e as faixas quentes.

O procedimento de discretização binária ou *Booleana* de variáveis, com a determinação de valores 1 e 0, é uma exigência do método de ponderação aqui empregado. A decisão *Booleana* parte do pressuposto de que podem ser discriminados aqueles valores a partir dos quais as variáveis passam a ser consideradas critérios diagnósticos do processo acumulador, especificamente nesse estudo, na alimentação dos sistemas acumuladores.

Para se investigar o poder das variáveis como indicadoras da presença de acumulações de petróleo na Bacia do Paraná foi utilizado o programa ANAFAV, o qual forneceu os valores de necessidade e suficiência de cada variável. Para a obtenção destes valores o procedimento adotado foi o seguinte :

- a) construção de uma planilha para cada sistema petrolífero, contendo o número das celas (1 a 1774) e as coordenadas UTM, seguidas por uma série de colunas, cada uma representada por uma variável, preenchidas por valores 0 (critério ausente) e 1 (critério presente). Para o sistema petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê os paleolineamentos identificados nas sequências devonianas não foram utilizados. As relações de variáveis encontram-se nas Tabelas 20 e 24;
- b) construção de duas planilhas de dados, uma para cada sistema, discriminando-se na área de estudo, os poços produtores daqueles não produtores; na primeira coluna entrou-se com a numeração das celas e na segunda coluna, as 1774 celas foram caracterizadas por um dos seguintes valores : -1 (poço presente, mas não produtor), 0 (sem informação) e 1 (poço presente e produtor). Para o sistema petrolífero inferior foram selecionados 12 poços nos quais ocorreram alguma produção de óleo e/ou gás, e no sistema superior o número foi de 15. As relações dos poços produtores são apresentadas nas Tabelas 21 e 25;
- c) no momento da execução do programa as seguintes solicitações foram preenchidas : número de variáveis independentes; número de celas; número de celas que tinham poços com valor 1; número de celas que tinham poços com valor -1; nome do arquivo contendo os valores para os poços; nome do arquivo contendo os valores das variáveis;

- d) após estas etapas, em alguns segundos o programa forneceu uma listagem dos ponderadores ω^+ e ω^- e também do contraste para cada variável; de acordo com o modelo estatístico adotado (ver p. 64), quanto maior a necessidade mais negativo será o ponderador ω^- , e quanto maior a suficiência mais positivo será o ponderador ω^+ . A variável que mostrar o mais alto contraste será aquela que apresenta, relativamente às outras, o maior poder indicativo de uma acumulação;
- e) também foi gerado um arquivo do tipo x, y, z contendo as coordenadas de cada cela, com os respectivos índices de favorabilidade, os quais variam de 0 a 1;
- f) os índices sugeridos pelo programa foram gridados no SURFER, e para cada um dos dois sistemas petrolíferos foi gerado um mapa de contorno dos valores de favorabilidade para a ocorrência de acumulações de petróleo.

Para a análise do sistema petrolífero inferior foi utilizado um conjunto de 24 variáveis, listadas na Tabela 20, que juntamente com as colunas contendo os números das celas e coordenadas, constituíram a planilha de trabalho para este sistema. Os poços produtores que foram utilizados para indicar a favorabilidade são listados na Tabela 21.

Após os cálculos efetuados pelo programa ANAFAV, dois arquivos foram gerados : um deles contendo os valores de ponderação e contraste de cada variável (Tabela 22) e o outro, do tipo x,y,z, trazendo os valores de favorabilidade para cada uma das 1774 celas.

TABELA 20 - Listagem das variáveis utilizadas na quantificação de favorabilidade no Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé.

v1	200 M BASAIS > 1500 M PROF.	v13	STTJ INFERIOR - NE
v2	GERADORA MATURA	v14	STTJ INFERIOR - NW
v3	STDM INFERIOR - NS	v15	INTRUS. - ALTOS VALORES NE
v4	STDM INFERIOR - NE	v16	INTRUS. - ADENSAMENTO NS+EW
v5	STDM INFERIOR - NW	v17	INTRUS. - ADENSAMENTO NE
v6	STDM SUPERIOR - NS+NW	v18	INTRUS. - ADENSAMENTO NW
v7	STDM SUPERIOR - NE	v19	RADAR/SAT - NS+NW
v8	STPP INFERIOR - NE	v20	RADAR/SAT - NE
v9	STPP INFERIOR - NW	v21	GRAVIMETRIA - NS+NW
v10	STPP SUPERIOR - NS	v22	GRAVIMETRIA - NE
v11	STPP SUPERIOR - NE	v23	GRAVIMETRIA - ALTOS NE
v12	STPP SUPERIOR - NW	v24	ESPES. PONTA GROSSA > 50 M

TABELA 21 - Relação dos poços que foram discretizados por valores *l*.

1	CA-1-PR	7	RP-1-PR
2	CA-3-PR	8	CS-1-PR
3	SE-1-SC	9	LS-1-PR
4	BB-1-PR	10	MO-1-PR
5	RI-1-PR	11	PT-1-PR
6	CB-1-SP	12	RS-1-PR

TABELA 22 - Valores de ponderação e contraste para cada variável do Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé.

V	ω^-	ω^+	c		V	ω^-	ω^+	c
4	-0.502	2.439	2.941		3	-0.05	0.829	0.879
16	-0.164	2.216	2.38		23	-0.087	0.606	0.693
7	-0.164	2.216	2.38		12	-0.031	0.424	0.455
6	-0.444	1.522	1.966		13	-0.012	0.136	0.148
2	-1.250	0.69	1.94		22	0.049	-0.423	-0.473
5	-0.069	1.522	1.591		21	0.07	-0.557	-0.627
11	-0.069	1.522	1.591		17	----	----	----
24	-1.003	0.424	1.427		18	----	----	----
1	-1.186	0.231	1.417		14	----	----	----
19	-0.192	1.012	1.204		10	----	----	----
20	-0.618	0.557	1.175		8	----	----	----
9	-0.107	0.829	0.936		15	----	----	----

Este último arquivo foi submetido à análise variográfica, optando-se pela modelagem do semivariograma omnidirecional apresentado na Figura 101. Constatou-se um grande número de pares em cada passo e bom ajuste do modelo adotado. Os parâmetros variográficos obtidos (Tabela 23) foram empregados na estimativa por krigagem, resultando no mapa de favorabilidade do Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé (Figura 102).

Os resultados da Tabela 22 demonstram que os mais altos contrastes e graus de suficiência são dados pelas seguintes variáveis : 4 (paleolineamentos NE da STDm Inferior), 16 (concentração de curvas NS + NW do pacote intrusivo) e 7 (paleolineamentos NE da STDm Superior). Já as variáveis mais necessárias foram aquelas de abrangência mais regional : 1 (isóbata de 1500 m dos 200 m basais do Itararé), 2 (geradora matura) e 24 (espessura maior que 50 m da unidade Ponta Grossa). Observa-se que os valores de suficiência e necessidade das variáveis 21 e 22 indicam que sua ausência aumenta a probabilidade de ter a acumulação (variáveis com grau muito baixo de necessidade) e sua presença diminuiu a probabilidade de ter a acumulação (variáveis com grau muito baixo de suficiência). O resultado também mostrou que algumas variáveis apresentaram associação nula com as ocorrências, impossibilitando o cálculo do ponderador, ou seja, $P(E_j|\overline{H})$ e $P(\overline{E}_j|\overline{H})$ foram iguais a zero.

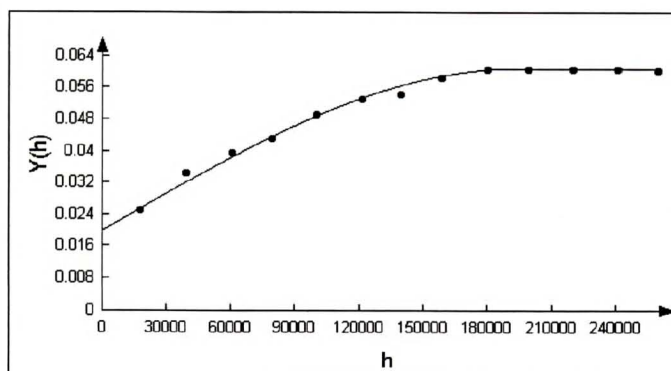


FIGURA 101 - Modelo esférico ajustados ao semivariograma omnidirecional. Os passos são de 20 ± 10 km.

TABELA 23 - Parâmetros variográficos adotados na krigagem.

	Dir.	Modelo	N	S	R	Elipse Pesquisa
SISTEMA INFERIOR	Omn.	esférico	0.02	0.041	192.800	Tipo : quadrante Dados por setor : 1 Mínimo total : 1 Máx. setores vazios : 0 R : 15 km

Dir.: direção analisada; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance

Sobre o mapa de favorabilidade da Figura 102, algumas constatações foram feitas :

- os altos valores de favorabilidade situados na região logo a norte de Guarapuava (PR) estão espacialmente associadas às estruturas locais, identificadas na STDM Inferior (Figura 79) e STDM Superior (Figuras 84);
- outra faixa, de menor favorabilidade, ocorre com direção NNE e passa nas proximidades de Goio-Erê (PR), Cianorte (PR), Paranavaí (PR) e Cuiabá Paulista (SP); esta faixa estrutural corresponde a um alto gradiente de espessura (Figura 94) e coincide com um paleolineamento ativo na época do evento magmático;

- c) uma área bastante interessante onde não existe informação a partir de poços, localiza-se na região nordeste do Paraná e oeste de São Paulo, nas proximidades de Bandeirantes (PR), Assis (SP) e Paraguaçu Paulista (SP). Trata-se de uma faixa NNE passando para NW com altos valores de favorabilidade, espacialmente associada a paleolineamentos da STDN Superior (Figura 83) e das intrusivas (Figura 94).
- d) os poços de Seara e Monjolinho, que chegaram a produzir algum hidrocarboneto, ficaram situados nas regiões de baixa favorabilidade, provavelmente indicando que nestes houve a influência de outro tipo de variável no sistema acumulador, não analisada neste trabalho;
- e) fora das regiões centro-oeste e nordeste do Paraná e oeste de São Paulo a favorabilidade ditada pelos lineamentos é quase nula. Tal afirmação encontra suporte nos resultados negativos obtidos na grande maioria dos poços perfurados na bacia, os quais encontram-se em regiões aqui definidas como de baixa favorabilidade;
- f) o único poço não produtor que ocorre numa zona de altíssima favorabilidade, na região centro-sul do Paraná, é o 1-GP-1-PR, onde possivelmente não havia uma estrutura trapeadora eficiente para reter o petróleo migrado; mesmo assim, considera-se que esta seja uma região que deva ser reavaliada nos futuros programas exploratórios.

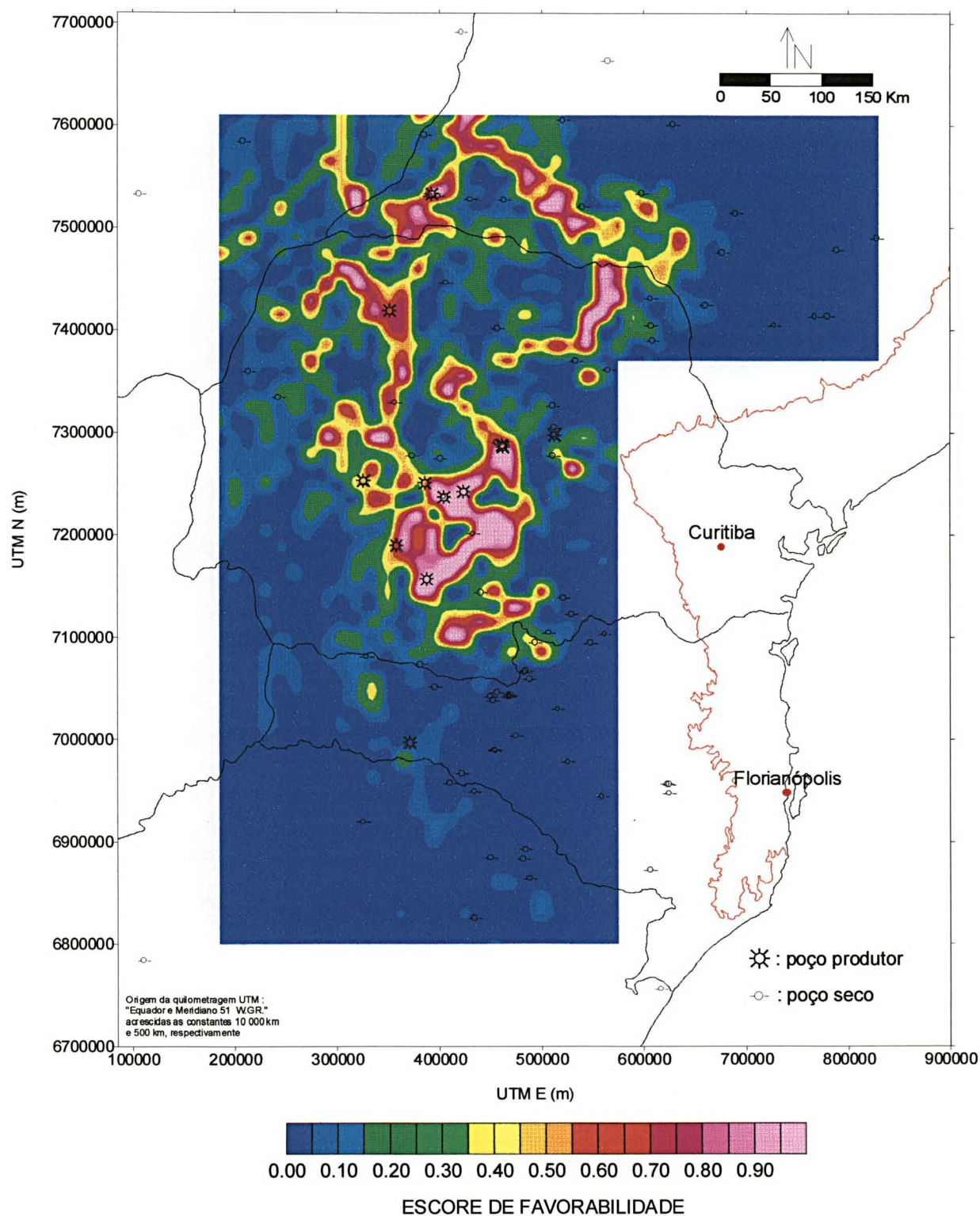


FIGURA 102 - Mapa de favorabilidade para o Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé.

Na avaliação do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê, foram utilizadas 18 variáveis, as quais estão listadas na Tabela 24. Os poços produtores utilizados para os cálculos encontram-se destacados na Tabela 25.

TABELA 24 - Listagem das variáveis utilizadas na quantificação de favorabilidade no Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê.

v1	BASE R. BON. > 1500 M PROF.	v10	INTRUS. - ALTOS VALORES NE
v2	GERADORA MATURA	v11	INTRUS. - ADENSAMENTO NS+EW
v3	STPP INFERIOR - NE	v12	INTRUS. - ADENSAMENTO NE
v4	STPP INFERIOR - NW	v13	INTRUS. - ADENSAMENTO NW
v5	STPP SUPERIOR - NS	v14	RADAR/SAT - NS+NW
v6	STPP SUPERIOR - NE	v15	RADAR/SAT - NE
v7	STPP SUPERIOR - NW	v16	GRAVIMETRIA - NS+NW
v8	STTJ INFERIOR - NE	v17	GRAVIMETRIA - NE
v9	STTJ INFERIOR - NW	v18	GRAVIMETRIA - ALTOS NE

TABELA 25 - Relação dos poços que foram discretizados por valores *I*.

1	RCH-1-SC	9	CS-1-PR
2	RV-1-PR	10	MC-1-SC
3	HV-2-SC	11	MC-2-SC
4	BB-1-PR	12	GU-4-SP
5	TP-2-SC	13	RS-1-PR
6	TV-1-SC	14	CN-1-SC
7	TG-1-SC	15	CN-2-SC
8	ES-1-RS		

A quantificação de favorabilidade desenvolvida no ANAFAV resultou em dois arquivos, sendo que na Tabela 26 são apresentados os ponderadores e contraste para cada variável. A continuidade espacial dos valores de favorabilidade foi analisada por geoestatística, donde resultou o modelo ajustado ao semivariograma omnidirecional (Figura 103), além dos parâmetros variográficos (Tabela 27) e o mapa de favorabilidade (Figura 104) estimado por krigagem.

Os resultados da Tabela 26 mostram que os mais altos valores de suficiência e contraste são dados pelas seguintes variáveis : 10 (resíduos positivos de espessura das intrusivas com direção NE), 8 (paleolineamentos NE da STTJ Inferior) e 17 (lineamentos gravimétricos NE). As variáveis mais necessárias foram : 1 (isóbata de 1500 m da base da Formação Rio Bonito) e novamente a 10 e 17.

As variáveis 2, 14, 15 e 18 apresentaram valores de suficiência e necessidade que indicam que sua ausência aumenta a probabilidade de ter a acumulação e sua presença diminuiu a probabilidade. As variáveis listadas ao final da Tabela 26 apresentaram associação nula com as ocorrências de hidrocarbonetos.

TABELA 26 - Valores de ponderação e contraste para cada variável do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê.

V	ω^-	ω^+	c		V	ω^-	ω^+	c
10	-0.453	1.955	2.408		18	0.051	-0.53	-0.581
8	-0.185	1.668	1.852		14	0.073	-0.684	-0.756
17	-0.232	1.262	1.494		2	0.164	-0.684	-0.847
1	-0.73	0.313	1.043		16	----	----	----
4	-0.044	0.346	0.39		11	----	----	----
3	-0.023	0.164	0.187		13	----	----	----
7	-0.011	0.164	0.174		6	----	----	----
12	-0.011	0.164	0.174		5	----	----	----
15	0.058	-0.081	-0.14		9	----	----	----

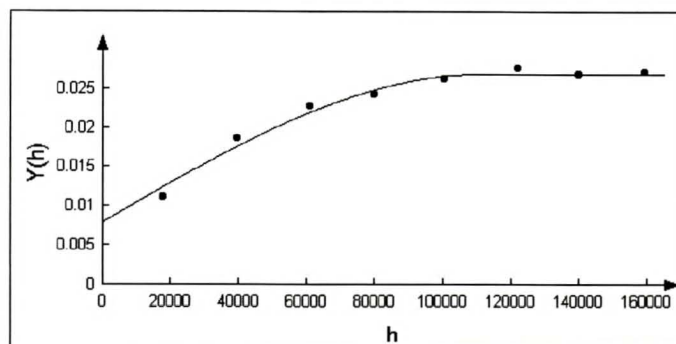


FIGURA 103 - Modelo esférico ajustado ao semivariograma omnidirecional. Os passos são de 20 ± 10 km.

TABELA 27 - Parâmetros variográficos adotados na krigagem.

	Dir.	Modelo	N	S	R	Elipse Pesquisa
SISTEMA SUPERIOR	Omn.	esférico	0.008	0.019	110.650	Tipo : quadrante Dados por setor : 1 Mínimo total : 1 Máx. setores vazios : 0 R : 15 km

Dir.: direção analisada; N: efeito-pepita; S: patamar; R: alcance

O mapa de favorabilidade do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê (Figura 104) mostra as seguintes feições :

- as melhores oportunidades da área encontram-se restritas à uma faixa NNE, que se estende da região de Passo Fundo (RS), passando por Joaçaba e Porto União, ambas cidades de Santa Catarina; nesta faixa também estão localizados os poços produtores de óleo com melhores resultados;
- à esta feição encontra-se intimamente associada a principal zona de valores positivos de resíduo de espessura das intrusivas na área de estudo, aqui considerada como uma "zona quente" (figuras 93 e 94), e também uma estreita faixa NE caracterizada por altos gradientes gravimétricos residuais (Figura 97);

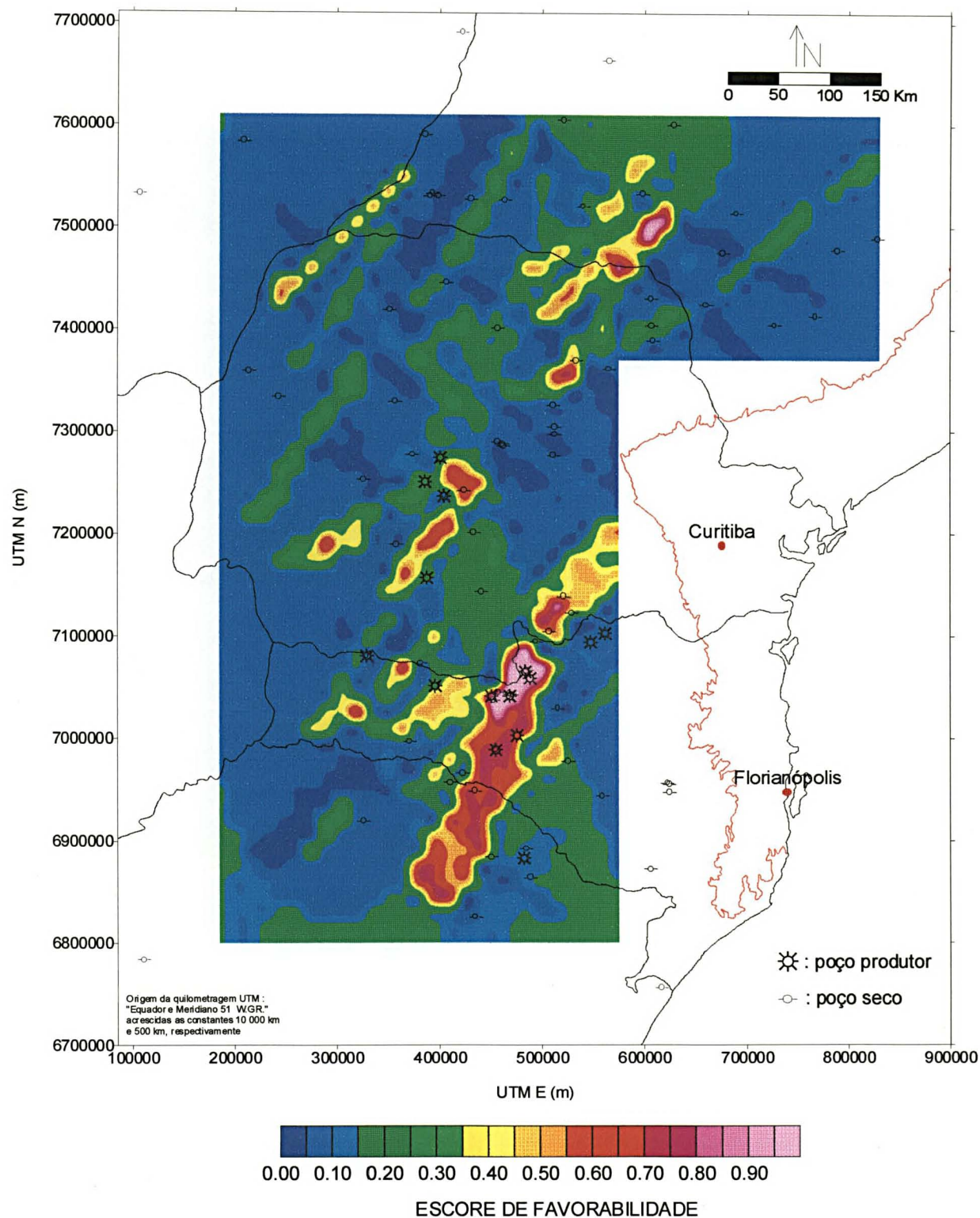


FIGURA 104 - Mapa de favorabilidade para o Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê.

- c) outras faixas ocorrem nas regiões centro-sul e nordeste do Paraná/oeste de São Paulo, mostrando-se estruturadas na direção NE; a área localizada no oeste de São Paulo, próxima ao município de Campos Novos Paulista (SP), mostra-se propícia, caso ocorram trapas, para a ocorrência de uma acumulação; essas estruturas associam-se espacialmente a paleolineamentos identificados na STTJ Inferior (Figura 90) e a lineamentos gravimétricos (Figura 97).
- d) quase metade dos poços produtores situa-se fora das áreas consideradas como as mais favoráveis pelo método, indicando uma baixa explicabilidade destas acumulações pelos lineamentos; provavelmente variáveis importantes para este sistema e que não foram avaliadas, como por exemplo, a morfologia e continuidade dos reservatórios Rio Bonito, tenham maior poder indicativo dessas acumulações;
- e) muitas faixas estruturais com direção NW localizadas entre a porção central do Paraná e sul de São Paulo ficaram nitidamente caracterizadas como de baixa favorabilidade;
- f) a quase totalidade dos poços secos perfurados na bacia situa-se em zonas de baixíssima favorabilidade.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é feita uma avaliação dos principais resultados obtidos no trabalho, primeiramente atendo-se às questões relativas aos paleolineamentos identificados com a análise das espessuras, comparando-os entre si e também com lineamentos obtidos por outros métodos. Ao final, faz-se uma apreciação do significado dos resultados proporcionados pelo método de quantificação utilizado. Convém ressaltar que não foi objetivo deste capítulo discutir a evolução da Bacia do Paraná, no que diz respeito às questões envolvendo os paleolineamentos com as características paleogeográficas, paleoambientais e com as relações estratigráficas entre as unidades rochosas que a compõem.

O procedimento metodológico desenvolvido e testado neste trabalho mostrou-se bastante eficiente na caracterização de paleo-estruturas. O rigoroso tratamento inicial dos dados, a compreensão e cuidadosa retirada dos fenômenos de escala regional, e o reconhecimento através da geoestatística, de que a distribuição espacial dos eventos locais estava atrelada a algum tipo de controle imposto pelo macroambiente, foram consideradas tarefas fundamentais que levaram, naturalmente, à revelação das paleo-estruturas. O leitor pôde constatar nos mapas de contorno gerados, que essas paleo-estruturas foram traçadas restritamente às regiões circunscritas a pontos onde haviam informações de poços e, portanto, dando maior credibilidade à sua existência. Isto significa que não foram interpretadas áreas de extrapolação de valores, mas apenas de interpolação.

Ao analisar em conjunto todos os mapas de resíduos de espessura, alguns aspectos merecem destaque :

- a) algumas estruturas locais com direção NE, responsáveis pelas taxas diferenciais maiores na STDM Inferior, atuaram como altos estruturais nos períodos de erosão da parte superior (Figuras 77 e 82). É interessante observar que relações deste

tipo já foram consideradas como efeito de erosão glacial e preenchimento de paleo-canais, entretanto a direção determinante é NE e não NS, que é a direção dos paleo-canais glaciais e de transporte. Na análise de sequências efetuada por Soares (1991) também foi constatada a influência de tectonismo associado às estruturas com direção nordeste, no início e no final do ciclo tectonossedimentar. As estruturas locais devonianas aqui mapeadas são espacialmente correlatas à faixa estrutural PT-2 de Soares *et al.* (1982; Figura 105) ou à continuação da zona de falha de Itapirapuã, que corta o embasamento (considerada como zona de falha de Taxaquara por Zalán *et al.* 1987; Figura 106);

- b) nas proximidades da região nordeste do Mato Grosso do Sul ocorreu o maior acúmulo e também preservação de sedimentos devonianos (Figuras 75 e 80), enquanto na época de sedimentação da STPP Inferior a mesma região comportou-se como um alto (Figura 85). Este tipo de reversão também fica bem evidente na região oeste de São Paulo, onde os sedimentos da STDM Superior foram submetidos a intensos efeitos erosivos ao longo de uma faixa NW, e exatamente nesta região houve o maior acúmulo de sedimentos da STPP Inferior, conforme já constatado por Soares *et al.* (1982);
- c) há nítida mudança no controle regional da distribuição das espessuras na passagem da STPP Inferior (Figura 85) para a STPP Superior (Figura 87). Na primeira, as espessuras tendem a ser mais contínuas em torno da direção EW, enquanto na segunda a disposição se dá, preferencialmente, ao longo da direção geral NS;
- d) a distribuição das espessuras acumuladas de corpos intrusivos (Figura 91), foi intensamente controlada por estruturas regionais NNE, as quais parecem ser responsáveis pela ocorrência de faixas preferenciais de alojamento;

Fazendo-se uma análise integrada entre os paleolineamentos traçados nos mapas de contorno e aqueles identificados por outros autores (Figuras 105 e 106), algumas similaridades podem ser observadas :

- a) nas unidades STDm Inferior e Superior (Figuras 79 e 84), STPP Inferior e Superior (Figuras 86 e 88) e no mapa gravimétrico (Figura 97) é possível constatar a presença de um paleolineamento correlato ao alinhamento de Guapiara (Ferreira 1982), ou zona de falha de Guapiara (Zalán *et al.* 1987) ou ainda faixa MI-6, de Soares *et al.* (1982);
- b) a faixa estrutural PR-1 de Soares *et al.* (1982) aparece nitidamente como um paleolineamento (adensamento de curvas) presente no mapa de contorno das intrusivas (Figura 94);
- c) nas STDm Inferior e Superior fica evidenciada a presença de um paleolineamento nordeste, correspondente à faixa estrutural PT-2 de Soares *et al.* (1982) ou à continuação da zona de falha de Itapirapuã;
- d) na sequência pensilvaniano-permiana (Figuras 86 e 88) fica caracterizada a faixa PT-10 de Soares *et al.* (1982), a qual aparece discretamente no mapa gravimétrico residual;
- e) no mapa gravimétrico residual (Figura 97) fica parcialmente delineado o alinhamento do Rio Alonzo (Ferreira 1982) ou falha do Rio Alonzo (Zalán *et al.* 1987) ou ainda faixa MI-3 (Soares *et al.* 1982);
- f) alguns segmentos da faixa estrutural PT-1 de Soares *et al.* (1982) ou da continuação da zona de falha Lancinha-Cubatão (Zalán *et al.* 1987) aparecem no mapa gravimétrico (adensamento de curvas) e ainda passando pela chamada "zona

quente" no mapa das intrusivas (Figura 94); com menor clareza a estrutura é observada nas sequências STPP Superior (Figura 88) e STTJ Inferior (Figura 90).

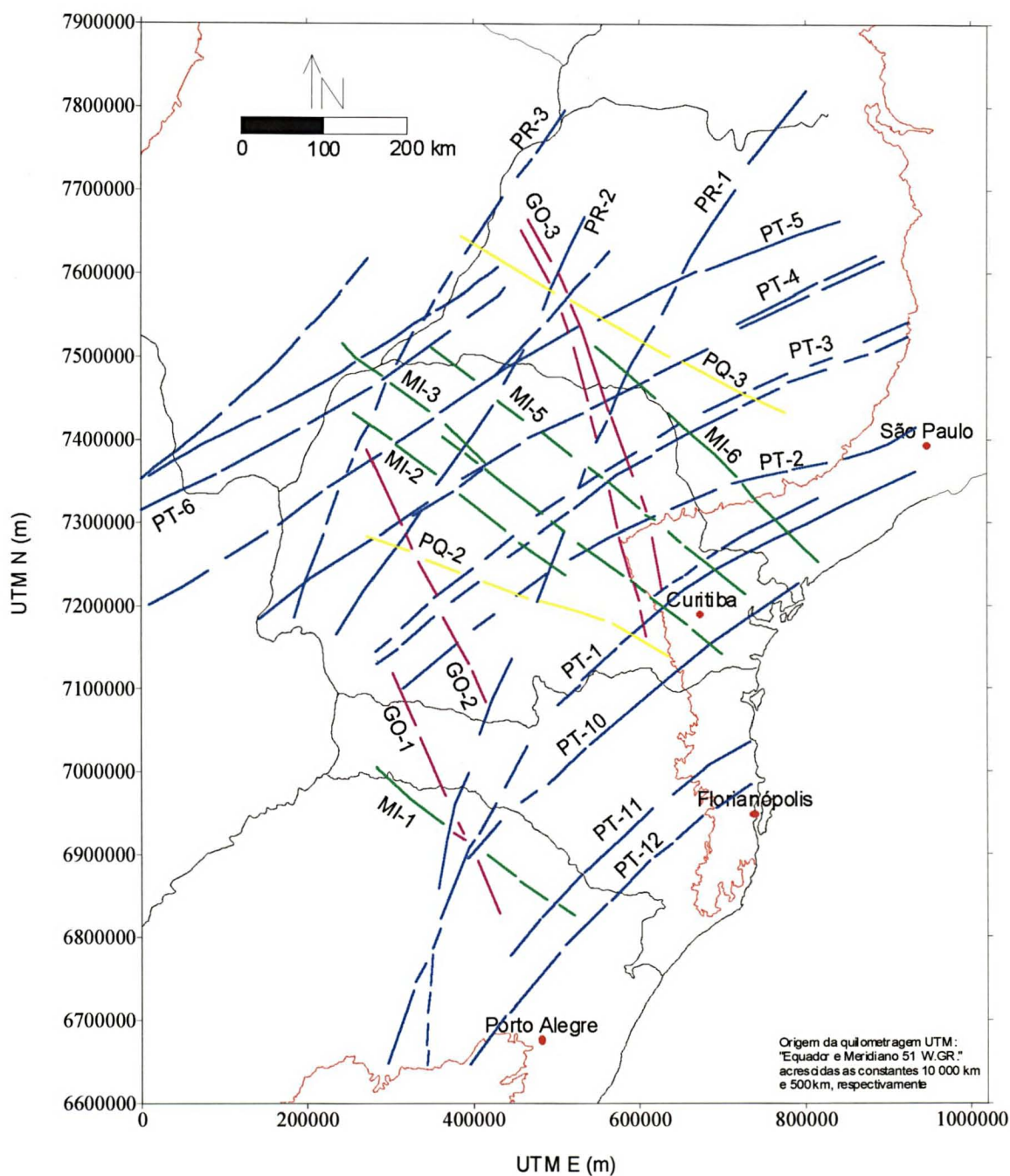


FIGURA 105 - Faixas estruturais definidas por Soares *et al.* (1982), às quais foram atribuídas as seguintes denominações : MI (Médio Ivaí), PQ (Médio Piquiri), PR (Paraná), GO (Goixim) e PT (Pitanga).

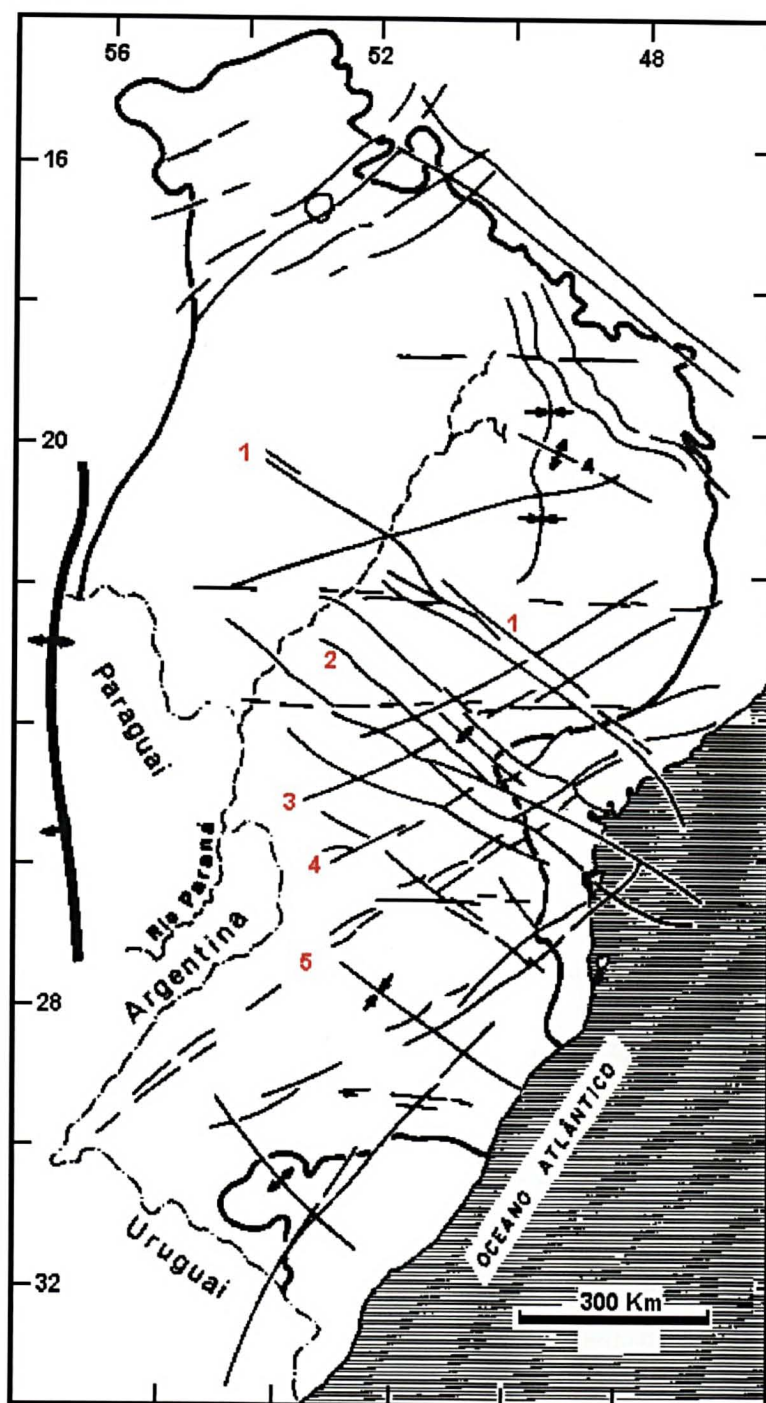


FIGURA 106 - Estruturas regionais mapeadas por Zalán *et al.* (1987). Apenas aquelas feições citadas no texto estão nomeadas. 1 : zona de falha de Guapiara; 2 : falha do Rio Alonzo; 3 : falha de Jacutinga; 4 : zona de falha de Taxaquara; 5 : zona de falha Lancinha-Cubatão.

Com isso, verifica-se que alguns dos paleolineamentos identificados neste estudo apresentam correspondência com aqueles lineamentos obtidos por diferentes autores e métodos, o que proporciona maior credibilidade aos resultados obtidos. Contudo, para muitas paleo-estruturas não se encontraram feições estruturais equivalentes já mapeadas, o que demonstra um bom potencial da metodologia adotada na identificação de "estruturas ocultas". Estas encontram-se mascaradas pelas estruturações regionais de grande amplitude, e somente com a retirada deste efeito e o adequado tratamento dos resíduos, é que surgirão.

Uma lição importante merece ficar registrada : qualquer que seja o conjunto de dados geológicos espacialmente distribuídos, as relações de vizinhança entre as amostras devem ser investigadas com a utilização da geoestatística, pois esta é a única ferramenta de trabalho que permite ao geólogo confirmar suas suspeitas, quanto às direções de atuação de um fenômeno.

Também uma crítica merece destaque : as interpretações efetuadas sobre os tradicionais mapas de isópacas das unidades litoestratigráficas, traçados manualmente ou por qualquer interpolador, que desconsidere a autocorrelação espacial da variável entre as posições amostradas, devem necessariamente ser vistas com suspeita. Tal afirmação é suportada pelos resultados intermediários alcançados durante esta pesquisa. Verificou-se que na simples prática de contornar manualmente dados de espessura, podem estar embutidos vícios do método ou do autor, o que traria à tona uma série de conclusões não fundamentadas, principalmente ao se trabalhar com pequena quantidade de dados.

O procedimento metodológico empregado pode ser considerado imparcial e os resultados podem a qualquer momento ser reproduzidos e conferidos.

Os resultados obtidos com a aplicação do método de quantificação de favorabilidade foram confrontados com os paleolineamentos identificados neste trabalho, possibilitando a realização de alguns comentários quanto à importância dessas estruturas.

Uma primeira observação a ser feita para ambos os sistemas petrolíferos analisados, diz respeito à pequena dispersão espacial dos resultados positivos em poços perfurados na bacia. Quase todos os poços produtores localizam-se restritamente às regiões central do Paraná (sistema inferior) e norte de Santa Catarina (sistema superior). Esta característica provavelmente acabou restringindo as possibilidades de predição de novas áreas de interesse, associadas a outros tipos de paleolineamentos.

O conjunto de variáveis considerado na avaliação de favorabilidade como ideal para que houvesse uma nova acumulação, ocorre em porções específicas da bacia, diretamente relacionado às acumulações conhecidas. Mesmo assim, o método foi apto na predição de novos alvos, os quais poderiam vir a ser investigados em campanhas futuras, pois define claramente quais elementos estruturais exerceram controle no processo de acumulação, particularmente na alimentação dos sistemas acumuladores.

Também é importante ressaltar que algumas variáveis importantes dos sistemas petrolíferos, tais como a continuidade e qualidade do reservatório e eficiência da rocha selante, não foram avaliadas; elas foram consideradas como condições necessárias existentes em todo o domínio analisado. Isto significa que os resultados de favorabilidade devem ser considerados com cautela, e as áreas caracterizadas pelos valores relativamente mais altos devem ser vistas como alvos prioritários a serem reavaliados (caso já os tenha sido), ou investigados por métodos sísmicos, com o objetivo de mapear e caracterizar trapas estruturais relacionadas aos paleolineamentos.

Para o Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé algumas estruturas já mapeadas em superfície mostraram boa correlação espacial com as áreas de maior favorabilidade para a acumulação de hidrocarbonetos (Figura 102) :

- a) na região centro-sul do Paraná, constatou-se um alto grau de explicabilidade das ocorrências por paleolineamentos com direção nordeste, identificados nos mapas das sequências devonianas; estas estruturas correspondem, em superfície, às faixas estruturais PT-2 e PT-3 que são correlatas às zonas de falha de Itapirapuã e Jacutinga, revelando que foram ativas no Devoniano e reativadas até o recente;
- b) na região nordeste do Paraná foi revelado um alvo, ainda não testado, destacado pelo método como favorável e, ao que parece, controlado estruturalmente pela faixa estrutural PR-1, que apresenta direção NNE; esta estrutura corresponde a um paleolineamento atuante na época do evento intrusivo;
- c) logo a norte deste prospecto ocorre uma faixa NW com boa favorabilidade, controlada por um alinhamento de altos estruturais identificado no mapa da STDN Superior; pode estar relacionada com a faixa estrutural MI-6 ou zona de falha de Guapiara;
- d) outras áreas menos atrativas também aparecem : uma compreendida entre as faixas estruturais noroeste MI-2 e MI-3 e outra associada a um paleolineamento NNE das intrusivas, o qual corresponde ao limite entre uma "zona quente" e uma "zona fria".

A partir destas observações, pode-se concluir que as faixas estruturais mais favoráveis para a ocorrência de acumulações de hidrocarbonetos neste sistema, seriam aquelas com direção nordeste ativas desde o Devoniano até o recente, e ainda estruturas NNE associadas ao evento tectono-magmático juro-cretáceo.

No Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê as áreas indicadas pelo método (Figura 104) relacionam-se às seguintes feições :

- a) a zona de maior favorabilidade, que contém os poços com melhores resultados, mostra-se alongada na direção NE e está intimamente associada à uma faixa constituída por maiores espessuras relativas acumuladas de *sills*; esta região também é cortada pela continuação da zona de falha Lancinha-Cubatão;
- b) provavelmente, a geração e migração do petróleo acumulado na área em questão, tenham sido favorecidas pelo calor adicional proporcionado pela intrusão de corpos concordantes com maior espessura, e também pela reativação da zona de falha Lancinha-Cubatão por sob a bacia, na época do magmatismo, a qual pode ter atuado como canalizadora dos fluidos (sistema de alimentação). Os estilos estruturais sugeridos por Soares *et al.* (1982) como sendo os mais comuns para a Bacia do Paraná, ou seja, os domos assimétricos e flexuras sobre falhas verticais com embasamento envolvido, podem vir a ser os responsáveis pelo trapeamento dos fluidos;
- c) outras faixas que apresentam boa probabilidade para a ocorrência de acumulações, dispõem-se na direção NE e situam-se no nordeste e centro-sul do Paraná. O método de quantificação sugere que estas zonas estariam associadas às estruturas identificadas no mapa de contorno de resíduos da STTJ Inferior.

Estas observações sugerem que, na área estudada, grande parte do petróleo contido neste sistema petrolífero, esteja espacialmente associada às regiões anormalmente aquecidas e às zonas de falha ativas entre os períodos Triássico e Juro-Cretáceo.

8 CONCLUSÕES

1. O procedimento metodológico adotado, que inclui a utilização conjunta de análise de tendência, análise variográfica, estimativa por krigagem e análise morfo-estrutural, provou ser eficiente na caracterização de paleo-estruturas.
2. A compreensão dos fenômenos de amplitude regional e sua retirada dos dados, permitiu que fenômenos de caráter mais local, antes ocultos, fossem identificados.
3. A análise variográfica mostrou ser uma ferramenta importante na predição de direções de maior e menor continuidade espacial de dados de espessura, consequentemente, levando à identificação das direções estruturais ativas em cada intervalo de tempo geológico analisado.
4. Alguns dos principais lineamentos mapeados em superfície e subsuperfície por outros autores, mostraram boa correlação espacial com os paleolineamentos aqui definidos, comprovando a eficiência da metodologia empregada.
5. A utilização do método de quantificação de favorabilidade permitiu determinar a importância das variáveis geológicas, em termos de necessidade e suficiência e sugerir, com imparcialidade, novas áreas na bacia a serem investigadas.
6. As áreas mais favoráveis do Sistema Petrolífero Ponta Grossa-Itararé estão condicionadas a paleolineamentos com direção nordeste, ativos no Devoniano e reativados até o recente.
7. As áreas mais favoráveis do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Tietê estão condicionadas às falhas com direção nordeste ativas entre os períodos Triássico e Juro-Cretáceo, e também àquelas regiões que sofreram aquecimento anômalo, devido à intrusão de um número relativamente maior de corpos intrusivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGTERBERG, F.P. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: APCOM SYMPOSIUM (21. : 1989 : Las Vegas). Proceedings... Las Vegas, 1989. p. 165-178.
- ALMEIDA, F.F.M. **Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil**. São Paulo : Relatório 14.091 - PAULIPETRO - Consórcio CESP/IPT. 1980.
- ANDRIOTTI, J.L.S. Introdução à geoestatística. **Estudos Tecnológicos - Acta Geologica Leopoldensia**, v. 11, n. 27, p. 7-82, 1988.
- ASSINE, M.L. O eólico e o fluvial na Formação Pirambóia. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA (5. : 1993 : Curitiba). Resumos... Curitiba, 1993. p. 53-54.
- ASSINE, M.L.; SOARES, P.C.; MILANI, E.J. Sequências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 2, p. 77-89, 1989.
- ASSINE, M.L. **Aspectos da estratigrafia das sequências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil**. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- BONHAM-CARTER, G.F.; AGTERBERG, F.P.; WRIGHT, D.F. Weights of evidence modelling : a new approach to mapping mineral potential. **Geological Survey of Canada**, Paper n. 89-9, p. 171-183, 1989.
- BRITO NEVES, B.B. DE et al. Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil : a case of tectonic heritage. **Journal of Geodynamics**, v. 1, p. 495-510, 1984.

- CASTRO, J.C. **A evolução dos sistemas glacial, marinho e deltáico das formações Rio do Sul e Rio Bonito/Membro Trinco (Eopermiano), sudeste da Bacia do Paraná.** Rio Claro, 1991. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- CHANG, K.H. Unconformity-bounded stratigraphic units. **GSA Bulletin**, v. 86, p. 1544-1552, 1975.
- CLARK, I. **Practical geostatistics.** Applied Science Publishers, 1979.
- CLARK, I. The semivariogram. In: MOUSSET-JONES, P.F. **Geostatistics.** McGraw-Hill, 1980, p. 17-40.
- CORDANI, U.G. et al. Estudo preliminar de integração do pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. Rio de Janeiro : PETROBRÁS (Série Ciência-Técnica-Petróleo, n. 15), 1984.
- DAEMON, R.F.; CASALETI, P.; CIGUEL, J.H.G. **Biopaleogeografia da Bacia do Paraná.** Curitiba : Relatório Interno - PETROBRÁS, 1991.
- DAEMON, R.F.; FRANÇA, A.B. Sedimentos do Westfaliano (Carbonífero Médio) na Formação Lagoa Azul, Grupo Itararé. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ (1. : 1993 : Rio Claro). Resumos... Rio Claro, 1993. p. 36.
- DAEMON, R.F.; QUADROS, L.P. Bioestratigrafia do Neopaleozóico da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA (24. : 1970 : Brasília). Anais... Brasília, 1970. p. 359-412.
- DEMAISON, G.; HUIZINGA, B.J. Genetic classification of petroleum systems. **AAPG Bulletin**, v. 75, n. 10, p. 1626-1643, 1991.

- DOBRIN, M.B.; SAVIT, C.H. **Introduction to geophysical prospecting**. 4. ed. McGraw-Hill, 1988.
- DOW, W.G. Application of oil correlation and source rock data to exploration in Williston basin (abs.). **AAPG Bulletin**, v. 56, p. 615, 1972.
- FERREIRA, F.J.F. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos : configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa**. São Paulo, 1982. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, USP.
- FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 2, n. 2-4, p. 147-191, 1988.
- FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. Stratigraphy and reservoir potential of glacial deposits of the Itararé Group (Carboniferous-Permian), Paraná Basin, Brazil. **AAPG Bulletin**, v. 75, n.1, p. 62-85. 1991.
- FÚLFARO, V.J. et al. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 12, n. 4, p. 590-611, 1982.
- GAMA JR., E. A sedimentação do Grupo Passa Dois (exclusive Formação Irati) : um modelo geomórfico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 9, n. 1, p. 1-16, 1979.
- GOULART, E.P.; JARDIM, N.S. Avaliação geoquímica das formações Ponta Grossa e Irati - Bacia do Paraná. In: PAULIPETRO - Consórcio CESP/IPT. **Geologia da Bacia do Paraná : reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos**. São Paulo, 1982, p. 41-74.
- HARDING, T.P.; LOWELL, J.D. Structural styles, their plate-tectonic habitats, and traps in petroleum provinces. **AAPG Bulletin**, v. 63, n. 7, p. 1016-1058, 1979.

- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics.** Oxford : Oxford University Press, 1989.
- JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, CH.J. **Mining geostatistics.** London : Academic Press, 1978.
- LANDIM, P.M.B. **Introdução à geoestatística.** Rio Claro : Laboratório de Geomatématica, D.G.G.A., IGCE, UNESP (publicação didática nº 2), 1985.
- LAVINA, E.L. **Geologia sedimentar e paleogeografia do Neopermiano e Eotriássico (intervalo Kazaniano-Scythiano) da Bacia do Paraná.** Porto Alegre, 1991. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LEIGHTON, M.W. et al. **Interior cratonic basins.** Tulsa : AAPG Memoir 51, 1990.
- LINK, P.K. **Basic petroleum geology.** 2. ed. Tulsa : OGCI Publications, 1987.
- LOWELL, J.D. **Structural styles in petroleum exploration.** Tulsa : OGCI Publications, 1985.
- MAGGON, L.B.; DOW, W.G. The petroleum system. **AAPG Memoir 60**, p. 3-24, 1994.
- MAGOON, L.B.; SÁNCHEZ, R.M.O. Beyond yhe petroleum system. **AAPG Bulletin**, v. 79, n. 12, p. 1731-1736, 1995.
- MANTOVANI, M.S.M. et al. Modelo gravimétrico das principais descontinuidades crustais nos terrenos pré-cambrianos dos estados do Paraná e de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, n. 3, p. 367-374, 1989.

- MILANI, E.J. et al. Bacia do Paraná : possibilidades petrolíferas da calha central. **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 4, n. 1, p. 21-34, 1990.
- MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B. **Petroleum potential of Paraná Basin, southern Brazil**. Inédito.
- MILANI, E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Porto Alegre, 1997. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MILTON, N.J.; BERTRAM, G.T. Trap styles - A new classification based on sealing surfaces. **AAPG Bulletin**, v. 76, n. 7, p. 983-999. 1992.
- MÜHLMANN, H. et al. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. Ponta Grossa : Relatório DESUL - 444 - PETROBRÁS, 1974.
- NELSON, W.J. Structural styles of the Illinois Basin. In : LEIGHTON, M.W. et al. **Interior cratonic basins**. Tulsa : AAPG Memoir 51, 1990. p. 209-243.
- NORTH, F.K. **Petroleum geology**. Winchester : Unwin Hyman Inc., 1985.
- OLIVEIRA, M.A.M. DE. Possibilidades de geração e migração tardias de petróleo na Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA (25. : 1971 : São Paulo). Anais... São Paulo, 1971. p. 139-157.
- PANNATIER, Y. **Variowin 2.1 : Help**. Lausanne : Institute of Mineralogy, University of Lausanne, 1994.
- ROSTIROLLA, S.P. **Avaliação de favorabilidade em exploração : um enfoque metodológico**. Rio Claro, 1996. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

- ROSTIROLLA, S.P. Alguns aspectos da avaliação de favorabilidade em geologia exploratória. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 4, p. 313-324, 1997.
- ROSTIROLLA, S.P.; SOARES, P.C.; CHANG, H.K. Bayesian and multivariate methods applied to favorability quantification in Recôncavo Basin and Ribeira Belt, Brazil. **Nonrenewable Resources**, v. 7, n. 1, p. 7-24, 1998.
- ROSTIROLLA, S.P.; SOARES, P.C.; STEVANATO, R. Alguns aspectos da análise sistêmica aplicada à exploração : sistema petrolífero versus sistema formador de minério. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA (39. : 1996 : Salvador). Anais... Salvador, 1996. p.
- SANFORD, R.M.; LANGE, F.W. Basin-study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline, south Brazil. **AAPG Bulletin**, v. 44, n. 8, p. 1316-1370, 1960.
- SEYLER, B.; CLUFF, R.M. Petroleum traps in the Illinois Basin. In : LEIGHTON, M.W. et al. **Interior cratonic basins**. Tulsa : AAPG Memoir 51, 1990. p. 361-401.
- SHAROV, A. 1995. Coletânea de figuras capturadas via Internet.
- SLOSS, L.L.; KRUMBEIN, W.C.; DAPPLES, E.C. Integrated facies analysis. In: LONGWELL, C.R. **Sedimentary facies in geology history**. GSA Memoir 39, 1949, p. 91-124.
- SLOSS, L.L. Sequences in the cratonic interior of North America. **GSA Bulletin**, v. 34, p. 423-451, 1963.
- SOARES, P.C. 1975. Divisão estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 5, p. 229-251, 1975.

- SOARES, P.C. **Estilos estruturais em bacias cratônicas : pesquisa de modelos para trapas na Bacia do Paraná.** São Paulo : Relatório RT-131/82 PAULIPETRO - Consórcio CESP/IPT. 1982.
- SOARES, P.C. Aplicação da geoestatística na avaliação de controle de paleo-lineamentos na sedimentação. **Geociências**, São Paulo, v. 7, p. 328-329, 1988.
- SOARES, P.C. **Tectônica sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná - controles.** Curitiba, 1991. Tese (Professor Titular) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- SOARES, P.C. et al. **Tectônica formadora e deformadora de sequências tectonossedimentares na Bacia do Paraná.** Curitiba : Projeto CNPq 530019/93. 1995.
- SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; CSORDAS, S.M. **Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (radar-landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná.** São Paulo : Relatório RT-342/82 - PAULIPETRO - Consórcio CESP/IPT. 1982.
- SOARES, P.C. et al. Tectônica formadora-deformadora da sequência pensilvaniano-permiana da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA (5. : 1993 : Curitiba). Atas... Curitiba : SBG, v. 1, 1987. p. 441-473.
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J. Tectonic cycles and sedimentary sequences in the brazilian intracratonic basins. **GSA Bulletin**, v. 89, p. 181-191, 1978.
- SWAN, A.R.H.; SANDILANDS, M. **Introduction to geological data analysis.** Oxford : Blackwell Science, 1995.

- ULMISHEK, G. Geologic evolution and petroleum resources of the Baltic Basin. In : LEIGHTON, M.W. et al. **Interior cratonic basins**. Tulsa : AAPG Memoir 51, 1990. p. 603-632.
- VAIL, P.R. et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3 : relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C.E. **Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration**. Tulsa : AAPG Memoir 26, 1977. p. 63-81.
- VALENTE, J.M.G.P. **Geomatemática - Lições de Geoestatística**. 2. ed. Ouro Preto : Fundação Gorceix, 8 volumes, 1982.
- VAN WAGONER, J.C. et al. Key definitions of sequence stratigraphy. In: BALLY, A.W. **Atlas of seismic stratigraphy**. Tulsa : AAPG (studies in geology n. 27), 1987. p. 11-14.
- YOSHIDA, R.; GAMA JR., E. Geologia da Bacia do Paraná : reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos. In: PAULIPETRO - Consórcio CESP/IPT. **Geologia da Bacia do Paraná : reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos**. São Paulo, 1982, p. 1-17.
- ZALÁN, P.V. et al. **Análise da Bacia do Paraná**. Rio de Janeiro : Relatório Interno - DEPEX/CENPES n. 1035-5765 - PETROBRÁS. 1986.
- ZALÁN, P.V. et al. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA (3. : 1987 : Curitiba). Atas... Curitiba : SBG, v. 1, 1987. p. 441-473.
- ZALÁN, P.V. et al. The Paraná Basin, Brazil. In : LEIGHTON, M.W. et al. **Interior cratonic basins**. Tulsa : AAPG Memoir 51, 1990. p. 681-708.